

**CENTRO PAULA SOUZA**  
**FATEC SANTO ANDRÉ**  
**Tecnologia em Eletrônica Automotiva**

**Caique Ribeiro da Silva**  
**Clayton Araújo Alencar**  
**Felipe Gustavo Nicolino**  
**Levy Guilherme Correia Romero**

**SISTEMA ANTITOMBAMENTO PARA EMPILHADEIRAS**

**Santo André – SP**  
**2024**

**Caique Ribeiro da Silva  
Clayton Araújo Alencar  
Felipe Gustavo Nicolino  
Levy Guilherme Correia Romero**

## **SISTEMA ANTITOMBAMENTO PARA EMPILHADEIRAS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado ao Curso de Tecnologia  
em Eletrônica Automotiva da Fatec  
Santo André, pelo Prof. Dr. Edson  
Caoru Kitani como requisito parcial  
para obtenção do título de tecnólogo  
em Eletrônica Automotiva

**Santo André - SP**

**2024**

**LISTA DE PRESENÇA**

Santo André, 14 de dezembro de 2024.

LISTA DE PRESENÇA REFERENTE À APRESENTAÇÃO DO  
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO COM O TEMA:  
“**SISTEMA ANTITOMBAMENTO PARA EMPILHADEIRAS DOS  
ALUNOS DO 6º SEMESTRE DESTA U.E.**”

**BANCA**

PRESIDENTE:  
PROFº. EDSON CAORU KITANI

MEMBROS:  
PROFº. ORLANDO DE SALVO JÚNIOR

PROFº. NICOLINO FOSCHINI NETO

**ALUNOS:**

CAIQUE RIBEIRO DA SILVA

CLAYTON ARAÚJO ALENCAR

FELIPE GUSTAVO NICOLINO

LEVY GUILHERME CORREIA ROMERO

S586s

Sistema antitombamento para empilhadeiras / Silva, Caique Ribeiro da... [et al.]. - Santo André, 2024. – 51f: il.

Trabalho de Conclusão de Curso – FATEC Santo André.  
Curso de Tecnologia em Eletrônica Automotiva, 2024.

Orientador: Prof. Dr. Edson Caoru Kitani

1. Eletrônica. 2. Sistema de segurança. 3. Antitombamento. 4. Empilhadeiras. 5. Projeto. 6. Sensor MPU 6050. 7. Tecnologia. 8. Desenvolvimento. 9. Equipamentos. I. Alencar, Clayton Araújo. II. Nicolino, Felipe Gustavo. III. Romero, Levy Guilherme Correia. IV. Sistema antitombamento para empilhadeiras.

621.3815

## **AGRADECIMENTO**

Agradecemos imensamente a todos os nossos familiares, principalmente por nos incentivar aos estudos e colaborar nesses períodos letivos.

Agradecemos a todos os colegas que estiveram conosco nesses 6 semestres, com que recebemos muito apoio, incentivo e muita ajuda nas dificuldades com alguns pontos das disciplinas da faculdade.

Enfim, muito obrigado ao corpo docente da Fatec Santo André, que compartilharam de seus conhecimentos, especialmente ao nosso orientador, professor doutor Edson Caoru Kitani, que sempre nos passou muito conhecimento em diversas disciplinas.

“O insucesso é apenas uma oportunidade para recomeçar com mais inteligência.”

Henry Ford

## RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver um sistema de antitombamento para empilhadeiras, utilizando o sensor MPU 6050. O estudo abordará inicialmente a história e evolução das empilhadeiras, destacando os avanços tecnológicos que possibilitaram melhorias na segurança e eficiência desses equipamentos ao longo do tempo. Será realizada uma análise dos acidentes envolvendo empilhadeiras, buscando identificar as principais causas e consequências desses eventos. Essa análise servirá como embasamento para a implementação do sistema de antitombamento, visando reduzir os riscos de acidentes e aumentar a segurança operacional das empilhadeiras. O sensor MPU 6050 será utilizado como parte integrante do sistema de antitombamento, sendo responsável por medir os ângulos de inclinação da empilhadeira e acionar os dispositivos de segurança necessários para evitar o tombamento do equipamento. Serão realizados testes e simulações para avaliar a eficácia do sistema, com o objetivo de desenvolver e avaliar um sistema antitombamento inovador para empilhadeiras. Ao final, espera-se contribuir para a redução dos acidentes envolvendo empilhadeiras, promovendo um ambiente de trabalho mais seguro e eficiente para os operadores desses equipamentos.

**Palavra-Chave:** Antitombamento. Empilhadeira. Segurança. MPU 6050.

## **ABSTRACT**

The present work aims to develop an anti-tip system for forklifts, using the MPU 6050 sensor. The study will initially address the history and evolution of forklifts, highlighting the technological advances that have enabled improvements in the safety and efficiency of these equipment over time. An analysis of accidents involving forklifts will be carried out, seeking to identify the main causes and consequences of these events. This analysis will serve as a basis for implementing the anti-tip system, aiming to reduce the risk of accidents and increase the operational safety of forklifts. The MPU 6050 sensor will be used as an integral part of the anti-tip system, being responsible for measuring the forklift's inclination angles and activating the necessary safety devices to prevent the equipment from tipping over. Tests and simulations will be carried out to evaluate the effectiveness of the system, with the objective of developing and assessing an innovative anti-tip system for forklifts. In the end, it is expected to contribute to the reduction of accidents involving forklifts, promoting a safer and more efficient work environment for operators of this equipment.

**Keywords:** Anti-tip. Forklift. Safety. MPU 6050.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - O "Trutractor" o primeiro caminhão industrial com motor de combustão interna no mundo .....	12
Figura 2 - Empilhadeira Clarklift dos anos 50.....	13
Figura 3 - Empilhadeira Hyster dos anos 80 .....	14
Figura 4 - Empilhadeira Clark S25 .....	15
Figura 5 - Triângulo de estabilidade .....	16
Figura 6 - Ponto de equilíbrio da empilhadeira.....	17
Figura 7 - Entendendo o centro de carga .....	18
Figura 8 - Farol de alerta lateral Blue Spot.....	20
Figura 9 - Alerta Lateral Red Zone .....	20
Figura 10 - Sistema de detecção de pedestres e empilhadeira.....	21
Figura 11 - Sistema de detecção de pedestres e empilhadeira.....	21
Figura 12 - Cobertura de Cabine.....	22
Figura 13 - Sensor MPU-6050.....	30
Figura 14 - Raspberry Pi Pico .....	31
Figura 15 - Motor de passo Nema 17 .....	31
Figura 16 - Driver Pololu 8825.....	32
Figura 17 - Pack de Bateria de 12V e 1.500mAh .....	32
Figura 18 - Empilhadeira de controle remoto Forklift Truck.....	33
Figura 19 - Esquema elétrico .....	36
Figura 20 - Componentes na placa PCB.....	37
Figura 21 - Peças impressas em 3D .....	38
Figura 22 - Programa principal .....	41
Figura 23 - Rampa para testes.....	42

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia

MPT – Ministério Público do Trabalho

NR – Norma Regulamentadora

OIT – Organização Internacional do Trabalho

## LISTA DE TABELA

Tabela 1 - Comparação dos Trabalhos.....	28
--	----

## Sumário

1 - Introdução .....	10
1.1 - Motivação .....	10
1.2 - Objetivo .....	10
1.3 - Justificativa.....	11
1.4 - Estrutura do Trabalho.....	11
2 - Revisão Bibliográfica.....	11
2.1 - A Evolução dos Equipamentos de Segurança em Empilhadeiras .....	12
2.2 - Segurança e Estabilidade .....	15
2.2.1 - Centro de carga.....	16
2.2.2 - Entendendo o centro de carga .....	17
2.2.3 - Sistemas de auxílio e segurança.....	19
2.2.4 - Acidentes.....	22
2.3 - Trabalhos Correlatos .....	23
2.3.1 - Modelagem e controle conceitual de um sistema antiqueda em veículos de duas rodas.....	23
2.3.2 - <i>Algorithm for Anti-Tip Over Function.</i> .....	24
2.3.3 - <i>Design of a counterbalance forklift based on a predictive anti-tip-over controller.</i> .....	26
2.3.4 - Principais características dos trabalhos. ....	28
2.3.5 - Considerações Finais.....	28
3 - Metodologia.....	30
3.1 - Seleção de Componentes e Tecnologias .....	30
3.2.1 - Escolha da Empilhadeira de Controle Remoto.....	33
3.2.2 - Critérios de Seleção .....	34
3.2.3 - Modelo Selecionado.....	34
3.2.5 - Confecção da Placa de Circuito Impresso .....	35

3.2.6 - Modelagem e Impressão 3D do Sistema de Contrapeso .....	37
3.2.7 - Resultados da Modelagem e Impressão .....	38
3.2.8 - Vantagens da Impressão 3D no Desenvolvimento do Protótipo.....	38
3.2.9 - Considerações Finais.....	39
3.3 - Desenvolvimento da Programação .....	39
3.3.1 - Estrutura do Programa .....	40
3.3.2 - Resultados e Considerações .....	41
4 - Testes e Resultados .....	42
4.1 - Estrutura e Condições de Teste .....	42
4.2 - Descrição dos Testes Realizados.....	42
4.3 - Resultados dos Testes .....	44
4.3.1 - Testes no Plano.....	44
4.3.2 - Testes na Rampa .....	44
4.4 - Análise dos Resultados.....	45
4.5 - Considerações Finais.....	45
5 – Conclusão .....	46
5.1 - Síntese dos Resultados .....	46
5.2 - Limitações e Desafios .....	46
5.3 - Recomendações para Trabalhos Futuros .....	46
5.4 Contribuições do Trabalho.....	47
5.5 Considerações Finais.....	47
6 - Referencias Bibliográficas.....	48
Bibliografia.....	48

## **1 - Introdução**

As empilhadeiras desempenham um papel crucial na movimentação de cargas em diversos setores industriais, facilitando o transporte e o armazenamento de materiais. No entanto, apesar dos benefícios que proporcionam, as empilhadeiras também apresentam riscos significativos de acidentes, especialmente o tombamento, que é uma das principais causas de lesões graves e fatalidades entre operadores e trabalhadores nas proximidades.

Diante dessa realidade, a implementação de sistemas antitombamento torna-se essencial para mitigar esses riscos e garantir a segurança dos operadores, dos demais trabalhadores e dos ativos da empresa.

### **1.1 - Motivação**

A segurança no manuseio de empilhadeiras é uma preocupação crescente nas indústrias devido ao aumento da automação e à intensificação das operações logísticas. Os acidentes envolvendo tombamento não só resultam em perdas financeiras consideráveis, mas também afetam a produtividade e a moral dos trabalhadores. A implementação de sistemas eficazes de prevenção de tombamento é, portanto, de extrema importância para a mitigação desses riscos e para a promoção de um ambiente de trabalho seguro.

### **1.2 - Objetivo**

O presente trabalho tem como objetivo desenvolver e avaliar um sistema antitombamento inovador para empilhadeiras, utilizando uma combinação de sensores avançados, algoritmos de controle adaptativo e um contrapeso móvel. Especificamente, pretende-se:

- Analisar os fatores críticos que contribuem para o tombamento de empilhadeiras.
- Desenvolver um protótipo de sistema antitombamento que monitorize em tempo real a estabilidade da empilhadeira.

- Validar a eficácia do sistema proposto por meio de testes experimentais e simulações.

### **1.3 - Justificativa**

A pesquisa é justificada pela necessidade de soluções mais eficazes e economicamente viáveis para a prevenção de tombamentos de empilhadeiras. A implementação de um sistema antitombamento avançado pode reduzir significativamente a ocorrência de acidentes, promovendo uma maior segurança no ambiente de trabalho e contribuindo para a sustentabilidade operacional das empresas.

### **1.4 - Estrutura do Trabalho**

O Trabalho de Conclusão de Curso está organizado da seguinte forma:

- Capítulo 1: Introdução – Apresenta o contexto, a relevância, os objetivos e a estrutura do trabalho.
- Capítulo 2: Revisão Bibliográfica – Discute as principais pesquisas, teorias e tecnologias relacionadas à prevenção de tombamento de empilhadeiras.
- Capítulo 3: Metodologia – Descreve os métodos e procedimentos utilizados para o desenvolvimento e avaliação do sistema proposto.
- Capítulo 4: Desenvolvimento do Sistema – Detalha o processo de desenvolvimento do protótipo.
- Capítulo 5: Resultados e Discussão – Apresenta os resultados dos testes experimentais e simulações, e discute a eficácia do sistema.
- Capítulo 6: Conclusão e Recomendações – Resume os principais achados do trabalho e sugere direções para pesquisas futuras.

## **2 - Revisão Bibliográfica**

O objetivo desta revisão bibliográfica é analisar as principais pesquisas, tecnologias e metodologias relacionadas ao desenvolvimento de sistemas antitombamento para empilhadeiras. Busca-se identificar os fatores que contribuem para o tombamento

dessas máquinas, as soluções tecnológicas já implementadas e suas respectivas eficácias. Além disso, a revisão visa mapear as inovações recentes e as lacunas existentes na literatura, proporcionando uma base teórica sólida para o desenvolvimento do sistema antitombamento proposto neste trabalho de conclusão de curso. A revisão também pretende contextualizar a problemática dentro do cenário industrial, destacando a importância da segurança operacional e as vantagens de um sistema eficaz de prevenção de tombamentos.

## 2.1 - A Evolução dos Equipamentos de Segurança em Empilhadeiras

As empilhadeiras são vitais para a logística moderna, mas seu uso apresenta riscos significativos à segurança. Desde sua criação, os equipamentos de segurança passaram por uma evolução substancial para proteger operadores e trabalhadores em ambientes industriais. Este texto explora a trajetória dos equipamentos de segurança em empilhadeiras, desde suas origens até as tecnologias modernas.

As primeiras empilhadeiras, como o vimos na Figura 1 Figura 1 Trutractor da Clark e os modelos elétricos da Yale, eram equipamentos rudimentares sem características de segurança específicas. Os operadores confiavam principalmente na habilidade manual e na cautela para evitar acidentes.

Figura 1 - O "Trutractor" o primeiro caminhão industrial com motor de combustão interna no mundo



Fonte - Clark Empilhadeiras (2024)

A partir dos anos 1950, a segurança das empilhadeiras começou a receber mais atenção. Com o aumento do uso industrial e o surgimento de normas de segurança no trabalho, as empilhadeiras passaram a incorporar características de segurança mais avançadas conforme mostra a Figura 2. Entre as inovações desse período, destacam-se: (Sunbelt, 2024)

Figura 2 - Empilhadeira Clarklift dos anos 50



Fonte - Clark Empilhadeiras (2024)

- **Capô de Proteção (*Overhead Guard*):** Introduzido para proteger o operador contra a queda de objetos, o capô de proteção se tornou um elemento padrão em todas as empilhadeiras.
- **Freios Melhorados:** Freios mais eficientes foram desenvolvidos, permitindo paradas mais seguras e controladas.
- **Sistemas de Direção Hidráulica:** Melhoraram a manobrabilidade das empilhadeiras, reduzindo o esforço do operador e aumentando a precisão nas operações.

Durante os anos 1980 e 1990, a Figura 3 mostra a tecnologia de segurança das empilhadeiras avançou significativamente. Esse período viu a introdução de sistemas eletrônicos e hidráulicos mais sofisticados, que aumentaram a segurança e a eficiência. (Sunbelt, 2024)

- **Cintos de Segurança:** Tornaram-se obrigatórios em muitas jurisdições, protegendo os operadores em caso de tombamento da empilhadeira.
- **Sistemas de Estabilidade:** Tecnologias como o Sistema de Estabilidade Ativa (SAS) da Toyota foram desenvolvidas para reduzir o risco de tombamento lateral, ajustando automaticamente a inclinação da empilhadeira em situações de risco.
- **Alarmes de Recuo:** Introduzidos para alertar pedestres e outros trabalhadores quando a empilhadeira está se movendo em marcha ré, reduzindo o risco de colisões.

- Iluminação e Sinalização: Faróis, luzes de aviso e sinais sonoros tornaram-se comuns, aumentando a visibilidade das empilhadeiras e avisando sobre sua presença e movimento.

Figura 3 - Empilhadeira Hyster dos anos 80



Fonte - LEXICAR Brasil (2014)

No século XXI, a segurança das empilhadeiras continuou a evoluir com a integração de tecnologias avançadas. As inovações mais recentes visam não apenas proteger o operador, mas também melhorar a segurança de todos no ambiente de trabalho e observamos essas inovações na Figura 4. (LEXICAR, 2024)

- Sensores e Sistemas de Aviso: Empilhadeiras modernas estão equipadas com sensores que detectam obstáculos e alertam o operador sobre perigos potenciais. Esses sistemas utilizam tecnologia de radar, ultrassom e câmeras para monitorar o ambiente ao redor da empilhadeira.
- Sistemas de Gerenciamento de Frota: Utilizam telemetria para monitorar o uso da empilhadeira em tempo real, fornecendo dados sobre o comportamento do operador, desgaste do equipamento e necessidades de manutenção. Isso ajuda a identificar práticas inseguras e a implementar medidas corretivas.
- Sistemas Automáticos de Freios e Controle de Velocidade: Esses sistemas ajustam automaticamente a velocidade da empilhadeira com base nas condições do ambiente e na proximidade de obstáculos, aumentando significativamente a segurança operacional.

- Cabines Ergonômicas e Controles Avançados: As cabines foram projetadas para maximizar o conforto e a segurança do operador, com controles intuitivos e ajustáveis, assentos com suspensão e sistemas de climatização.
- Integração com Internet das Coisas (IoT): Empilhadeiras conectadas à IoT permitem monitoramento remoto e análise de dados, promovendo uma manutenção preditiva e uma gestão mais eficiente da segurança. (Sunbelt, 2024)

Figura 4 - Empilhadeira Clark S25



Fonte - Clark Empilhadeiras (2024)

## 2.2 - Segurança e Estabilidade

A segurança e a estabilidade das empilhadeiras são questões cruciais no ambiente industrial, onde esses equipamentos desempenham um papel vital na movimentação de materiais. A operação de empilhadeiras envolve riscos significativos, tanto para os operadores quanto para os trabalhadores ao redor, devido à possibilidade de tombamentos e outros acidentes. Estimativas indicam que um número considerável de acidentes de trabalho graves e fatais estão associados ao uso inadequado ou à falha de sistemas de segurança dessas máquinas.

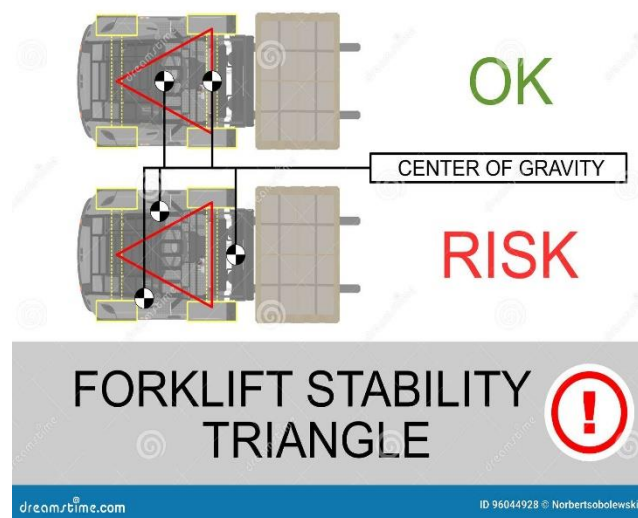
Este subcapítulo aborda os principais aspectos relacionados à segurança e à estabilidade de empilhadeiras, com foco em sistemas de prevenção de tombamentos. Primeiramente, serão apresentados os conceitos fundamentais de estabilidade das empilhadeiras e os fatores que influenciam essa estabilidade. Em seguida, serão

discutidos os métodos tradicionais e as inovações tecnológicas voltadas para a segurança, incluindo sistemas de monitoramento e controle automático. Por fim serão analisadas as principais causas de acidentes em empilhadeiras.

### 2.2.1 - Centro de carga

Conforme podemos ver na Figura 5 o centro de carga ou triângulo de estabilidade é um dos fatores de maior importância quando se fala em movimentação de matéria com empilhadeiras, e ainda assim é desconsiderado pela grande maioria dos usuários que estão adquirindo um equipamento para esse fim. A má interpretação, ou falta dela, do centro de carga ainda é uma das principais causas de acidentes de trabalho envolvendo equipamentos de movimentação de carga. Além disso, o centro de carga define o tamanho do seu equipamento. Por esse motivo, listamos abaixo algumas dicas e orientações para auxiliar na determinação do centro de carga e garantir a segurança do operador e bom funcionamento do equipamento. (Silva, 2020)

Figura 5 - Triângulo de estabilidade



Fonte - Sobolewski, Norbert (2012)

### 2.2.2 - Entendendo o centro de carga

O centro de carga, também conhecido como centro de gravidade, é o parâmetro que define a capacidade nominal do equipamento nominal do equipamento para elevar com equilíbrio uma carga sem que haja risco de tombamento. Cada equipamento possui o seu centro de carga, que varia de acordo com o peso, as dimensões e a altura de levante do material a ser transportado e/ou erguido.

Na Figura 6 vemos que todo equipamento utilizado em processos de movimentação de carga deve conter um demonstrativo, seja na forma de gráfico ou tabela, que relacione o centro de carga com o peso permitido e a altura de levante do material. Para que se mantenha o equilíbrio, à medida que se aumenta a elevação, reduz-se gradativamente a capacidade permitida. Essa proporção de capacidade x altura de elevação chama-se capacidade residual, e cada equipamento tem a sua própria tabela. (Silva, 2020)

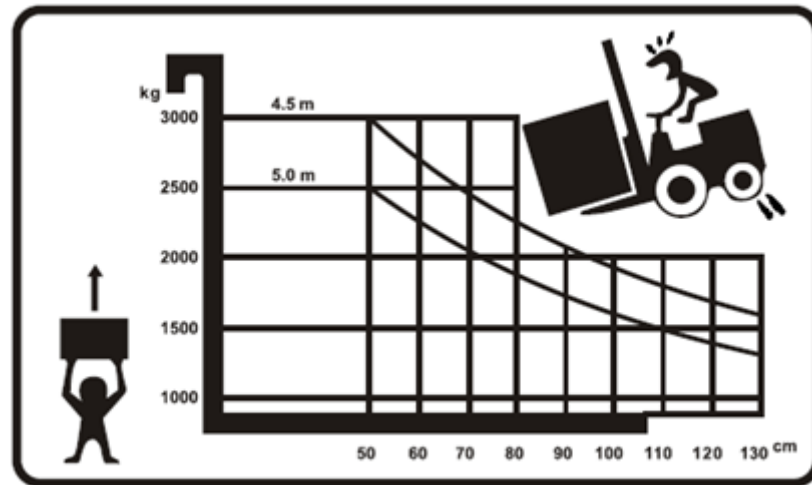
Figura 6 - Ponto de equilíbrio da empilhadeira



Fonte - CTS Silva (2020)

Como exemplo de centro de carga e capacidade residual, podemos fazer a seguinte leitura do gráfico conforme a Figura 7: a empilhadeira levanta um peso máximo de 3000 quilos a altura de 4,5 metros para uma carga com centro de carga de 50 centímetros, ou seja, de dimensão 100 x 100 x 100 centímetros.

Figura 7 - Entendendo o centro de carga



Fonte - CTS Silva (2020)

Observemos as dimensões da carga são tão importantes quanto peso em si. Quanto maior o volume do material transportado menor a capacidade em peso suportada pelo equipamento uma vez que o centro de carga é deslocado.

Além da altura de elevação, do peso e das dimensões da carga, que são os fatores principais nessa análise, existem outros aspectos importantes que também contribuem diretamente para a redução da capacidade de carga do equipamento. São eles: (Silva, 2020)

- A velocidade de operação durante os processos de movimentação. Quanto mais rápida a operação, menor a estabilidade da máquina e da carga que ela movimenta.
- Os acessórios que o equipamento utiliza, como o deslocador lateral e os clamps em geral, que deslocam o centro de carga da máquina.
- O raio de giro. Quanto mais acentuada a curva maior o risco de tombamento.
- O nivelamento do chão de operação. Quanto mais desnivelado for o piso, maior o risco de tombamento.
- O vencimento de rampa. Quando o equipamento precisa subir ou descer uma rampa o centro de carga é deslocado pela força da gravidade.

É importante lembrar ainda que a empilhadeira, por questão de segurança e equilíbrio, deve sempre se movimentar com as lanças abaixadas e com a torre inclinada para trás, aspectos simples que favorecem o centro de gravidade da sua máquina. Esses simples esclarecimentos asseguram a estabilidade do seu processo

de movimentação, reduzem o risco de tombamento do seu equipamento e oferecem segurança para o operador e o ambiente de trabalho.

Com esses conceitos gerais já esclarecidos, vale alertar sobre a importância desse parâmetro no que diz respeito ao tamanho e capacidade do seu equipamento. Por exemplo: uma empilhadeira de 5.000 quilos de capacidade com centro de carga de 500 milímetros (linha leve) é consideravelmente menor do que uma empilhadeira para 5.000 quilos de capacidade com centro de carga de 600 milímetros (linha pesada). Essa diferença de centro de carga para equipamentos da “mesma capacidade” é muito comum em empilhadeira de grande porte, acima de 5.000 quilos. (Silva, 2020)

### **2.2.3 - Sistemas de auxílio e segurança**

Os equipamentos de segurança para empilhadeiras permitem uma operação com total segurança para os operadores e pedestres que precisam circular na área circular. Por isso, alguns itens são obrigatórios.

Antes de tudo é importante compreender que as atividades envolvendo operação com empilhadeiras são consideradas de alto risco. Principalmente por envolver operadores, pedestres e cargas manuseadas no mesmo ambiente operacional.

Sendo assim, usar equipamentos de segurança para empilhadeiras é fundamental para impedir riscos à operação e, também, evitar acidentes entre empilhadeiras e pedestres que ali circulam.

Nos tempos atuais, no mercado existem alguns sistemas de auxílio e segurança para se instalar em empilhadeiras e melhorar as condições de trabalho e segurança no ambiente laboral, iremos citar alguns sistemas abaixo que se tem no mercado. (Sunbelt, 2024)

- Farol de alerta lateral Blue Spot: Conforme figura 8 é acoplado na empilhadeira uma luz azul que fica apontada para o chão e ilumina o ambiente operacional a muitos metros à frente e atrás da empilhadeira. Sendo assim, qualquer pessoa verá a luz azul e saberá da aproximação da máquina.

Figura 8 - Farol de alerta lateral Blue Spot



*Fonte - AHM Solution (2023)*

- Alerta lateral Red Zone: Conforme figura 9 a luz vermelha é instalada nas laterais da empilhadeira, que garante o espaço seguro entre empilhadeiras e pedestres

Figura 9 - Alerta Lateral Red Zone



*Fonte - AHM Solution (2023)*

- Sistema de detecção de pedestres e empilhadeira: Conforme figura 10 é um dispositivo inserido na empilhadeira que alerta quando a aproximação dela. Dessa forma controla com confiabilidade e precisão o tráfego de operadores e pedestres na área operacional.

Figura 10 - Sistema de detecção de pedestres e empilhadeira



Fonte - AHM Solution (2023)

- Câmeras em ponto cego: Empilhadeiras grandes podem tomar as operações difíceis e perigosas, pois haverá bastante pontos cegos. Conforme figura 11 a instalação de câmeras específicas ajuda eliminar esses pontos, aumentando a segurança e facilitando as manobras com empilhadeiras.

Figura 11 - Sistema de detecção de pedestres e empilhadeira



Fonte - AHM Solution (2023)

- Cobertura da cabina: Conforme figura 12, auxilia na segurança de operações com empilhadeiras expostas a intempéries ao trabalharem em ambientes abertos, e com proteção na projeção de materiais no operador.

Figura 12 - Cobertura de Cabine



Fonte - John Harder & Company (2021)

- Acessórios de borracha no garfo da empilhadeira – garantem segurança e proteção ao adicionarem aderência e estabilidade no levantamento ou movimentação de cargas pesadas no ambiente laboral. (AHM, 2001)

#### 2.2.4 - Acidentes

Máquinas e equipamentos são os principais causadores de acidentes de trabalho no Brasil, respondendo por 15% do total registrado entre 2012 e 2021. Somente este grupo respondeu por 734.786 ocorrências no período – uma média de 200 acidentes por dia. Os dados são do Observatório Digital de Saúde e Segurança do Trabalho, desenvolvido pelo Ministério Público do Trabalho (MPT) em cooperação com a Organização Internacional do Trabalho (OIT).

Segundo as estatísticas do MPT, os acidentes provocados por máquinas e equipamentos resultaram em 2.756 mortes entre 2012 e 2021, o que representa 12% do total de casos fatais neste período. Já o Ministério de Saúde informa que acidentes com máquinas e equipamentos resultaram em amputações e outras lesões gravíssimas com uma frequência 15 vezes maior do que as demais causas, gerando três vezes mais acidentes fatais que a média geral. (OSST, 2024)

## **2.3 - Trabalhos Correlatos**

Para realizar o estudo sobre o tema de trabalho, foi realizada uma pesquisa no google acadêmico e foram encontrados alguns trabalhos correlatos sobre o sistema antitombamento, e neste capítulo serão citados 3 trabalhos, um sobre sistema antitombamento ou antiqueda de veículos de duas rodas e outros dois ligados a empilhadeiras.

### **2.3.1 - Modelagem e controle conceitual de um sistema antiqueda em veículos de duas rodas**

O primeiro trabalho foi apresentado por Simoni Maria Gheno, Ranielle Barbosa de Souza, Luana Caroline Moschegni e Marcello Cláudio de Gouvêa Duarte no Simpósio de Tecnologia da Fatec Sertãozinho em 2022, onde é abordado um sistema de antitombamento ou antiqueda de veículos de duas rodas.

O trabalho propõe um sistema automático de controle de orientação para motocicletas em curvas de alta velocidade, visando reduzir acidentes. Inicialmente, destaca-se o aumento da procura por motocicletas, mas também o aumento correspondente nos acidentes, ressaltando a necessidade de soluções de segurança.

O projeto aborda diferentes tentativas para evitar quedas, incluindo sistemas de controle automático de orientação e sistema de duas rodas na dianteira para evitar quedas durante curvas.

A abordagem metodológica inclui estudos de modelagem, controle e simulação. A modelagem é realizada com o objetivo de compreender o ângulo de rolagem em um grau de liberdade, considerando o fechamento de malha por meio de sensores inerciais, como giroscópios. O controle proposto visa auxiliar dinamicamente durante o movimento, com a proposta de um atuador para gerar a ação de controle identificada na modelagem.

Na revisão bibliográfica, são explorados conceitos de modelagem mecânica, como o pêndulo invertidos, e métodos de controle, como o método de Kane e controle PDI (Proporcional mais Integral mais Derivativo). O trabalho também aborda a dinâmica

da motocicleta, destacando a importância da potência, forças de resistência e o papel do torque do piloto.

Os procedimentos metodológicos incluem o estudo de métodos heurísticos para o ajuste de controladores, considerando ensaios práticos para obtenção de leituras da planta do processo. A modelagem é realizada com software de simulação de corpos rígidos, como o MuJoCo e o Gazebo, explorando diferentes graus de liberdade ao longo do ângulo de rolagem.

Os resultados e discussões destacam a eficácia dos controladores, como o PID, na estabilização do sistema. A simulação mostra a relação angular do sistema ao longo do tempo e a variação da velocidade angular do giroscópio, demonstrando a capacidade do sistema proposto em manter o equilíbrio da motocicleta.

Por fim, as considerações finais destacam a importância da aplicação do controle automático de equilíbrio com o auxílio de um giroscópio para aumentar a segurança das motocicletas. O estudo da dinâmica do conjunto e a integração do controlador com o giroscópio foram fundamentais para alcançar os objetivos do trabalho. (Gheno et al., 2022)

### **2.3.2 - Algorithm for Anti-Tip Over Function**

O segundo trabalho foi escrito por Jens Franzon em 2020 e é sobre o desenvolvimento de uma função antitombamento para empilhadeiras da Cargotec, especificamente para o modelo ECG160-12. A proposta do trabalho é implementar um algoritmo que utilize sensores e cálculos de dinâmica para prevenir o tombamento da empilhadeira em situações de risco, garantindo a segurança durante as operações de movimentação de carga. O objetivo principal é desenvolver uma solução eficaz para evitar acidentes e garantir a estabilidade do equipamento em diferentes condições de trabalho.

A abordagem metodológica adotada envolveu uma análise detalhada da dinâmica da empilhadeira, considerando fatores como centro de gravidade, capacidade de carga e altura de elevação. Com base nessa avaliação, foi desenvolvido um algoritmo específico para prevenir o tombamento da empilhadeira em situações de risco.

Além disso, a metodologia inclui a identificação dos sensores necessários para fornecer informações essenciais ao algoritmo antitombamento, garantindo a precisão e eficácia da função de segurança. Uma avaliação abrangente dos componentes de

segurança foi realizada para assegurar a robustez do sistema e a confiabilidade da função antitombamento.

O trabalho apresentou uma proposta detalhada de como a função antitombamento poderia ser implementada, considerando a integração dos sensores, os cálculos de apoio e a estrutura do algoritmo desenvolvido. Essa abordagem metodológica abrangente visou não apenas prevenir acidentes de tombamento, mas também contribuir para a segurança dos operadores e a eficiência das operações de movimentação de carga, atendendo aos objetivos de desenvolvimento de máquinas autônomas de movimentação de carga da Cargotec.

Na revisão bibliográfica foram explorados diversos aspectos relacionados à segurança e estabilidade de empilhadeiras, com foco no desenvolvimento de uma função antitombamento. Foram analisados estudos sobre a dinâmica das empilhadeiras, incluindo o comportamento do centro de gravidade, a influência da altura de elevação e a capacidade de carga na estabilidade do equipamento.

Além disso, foram revisados algoritmos existentes utilizados para prevenir o tombamento de empilhadeiras, destacando suas vantagens e limitações. Também foram abordados os diferentes tipos de sensores utilizados em sistemas de segurança de empilhadeiras, como sensores de inclinação, sensores de carga e sensores de altura. A revisão bibliográfica inclui ainda estudos sobre as metodologias de avaliação de segurança em equipamentos de movimentação de carga, com ênfase na prevenção de acidentes e na garantia da integridade dos operadores. Exemplos de implementação de funções de segurança em empilhadeiras e outros equipamentos industriais também foram analisados, destacando boas práticas e desafios comuns nesses processos. Esses temas foram explorados para embasar o desenvolvimento da função antitombamento proposta para as empilhadeiras da Cargotec, contribuindo para a compreensão dos conceitos e tecnologias relevantes nessa área.

Os procedimentos metodológicos adotados neste trabalho envolveram uma análise detalhada da dinâmica da empilhadeira, considerando fatores como centro de gravidade, capacidade de cargas e altura de elevação. Com base nessa avaliação, foi desenvolvido um algoritmo específico para prevenir o tombamento da empilhadeira em situações de risco. Além disso, foram identificados os sensores necessários para fornecer as informações essenciais ao algoritmo antitombamento, garantindo a precisão e eficácia da função de segurança. Uma avaliação abrangente dos

componentes de segurança foi realizada para assegurar a robustez do sistema e a confiabilidade da função antitombamento.

Os resultados e discussões do trabalho abordaram a eficácia do algoritmo antitombamento desenvolvido, demonstrando sua capacidade de manter a empilhadeira estável em diferentes situações de trabalho. Foram apresentados gráficos e análises que evidenciaram a eficiência da função de segurança, bem como os benefícios em termos de prevenção de acidentes e melhoria da segurança dos operadores. Dilemas e desafios enfrentados durante o desenvolvimento e implementação da função antitombamento também foram discutidos, destacando aspectos importantes para futuras melhorias e otimizações.

As considerações finais do trabalho ressaltam a importância da função antitombamento para a segurança dos operadores e a eficiência das operações de movimento de carga. Foi destacado o impacto positivo da implementação dessa função. Não apenas na prevenção de acidentes de tombamento, mas também na redução de danos materiais e no aumento da produtividade. Recomendações para aprimoramentos futuros e possíveis aplicações em outros equipamentos da Cargotec foram apresentadas, enfatizando a relevância contínua do desenvolvimento de tecnologias de segurança avançadas para o setor de movimentação de carga. (Franzon, 2020).

### ***2.3.3 - Design of a counterbalance forklift based on a predictive anti-tip-over controller***

O terceiro trabalho foi escrito por Jesus Felez e Alvaro Bermejo em 2018 e é sobre o design de um contrapeso para empilhadeira com um controlador preditivo antitombamento. A proposta central é desenvolver um sistema de controle que melhore a estabilidade de empilhadeiras, especialmente em situações de risco de tombamento. O objetivo é garantir a segurança durante as operações de transporte de matérias, reduzindo o risco de acidentes e melhorando a eficiência operacional.

A abordagem metodológica adotada neste estudo envolve uma série de etapas. Inicialmente, é realizada a modelagem e simulação do sistema de controle antitombamento para compreender o comportamento do veículo em diferentes cenários. Em seguida, são conduzidas análises de estabilidade para identificar os fatores que podem levar ao tombamento da empilhadeira. Com base nesses

resultados, é desenvolvido um controlador preditivo baseado em *Model Predictive Control* (MPC) para melhorar a estabilidade do veículo. Além disso, é fabricado um protótipo em escala para validar a eficácia do controlador e identificar possíveis problemas de design em estágios iniciais.

Nas revisões bibliográficas realizadas para este trabalho, foram explorados diversos aspectos relacionados à estabilidade de empilhadeiras. Estudos anteriores sobre a instabilidade inerente desses veículos, modelos dinâmicos equivalentes, análises de estabilidade em curvas e proposta de sistemas de monitoramento e controle baseados em sensores foram abordados. Além disso, foram discutidas questões como otimização multiobjetivo em projetos de sistema de controle e técnicas de controle de trajetória para veículos móveis. Essa revisão da literatura proporcionou uma base teórica sólida para o desenvolvimento do trabalho e a implementação do controlador preditivo antitombamento.

Os procedimentos metodológicos deste estudo incluem a modelagem e a simulação do sistema, análise de estabilidade, o desenvolvimento e a implementação do controlador MPC, a realização de simulações em malha aberta e a validação do controlador por meio de um protótipo em escala. Os resultados e discussões demonstram a eficácia do controlador na melhoria da estabilidade de empilhadeira, evitando o risco de tombamento e permitindo manobras mais rápidas e seguras. As considerações finais destacam a importância do controlador baseado no controle do ângulo de inclinação para aumentar a segurança, reduzir os tempos de transporte e diminuir os custos operacionais, tornando o sistema mais eficiente e seguro. (Felez et al., 2018).

### 2.3.4 - Principais características dos trabalhos.

Os três trabalhos correlatados estão relacionados à segurança e evitar algum tipo de queda, podendo ser de um veículo ou de uma carga em situações de risco. Vamos citar agora as principais características desses 3 trabalhos.

Tabela 1 - Comparação dos Trabalhos

<b>Características</b>	<b>Trabalho 1: Motocicletas</b>	<b>Trabalho 2: Empilhadeiras Cargotec</b>	<b>Trabalho 3: Contrapeso para Empilhadeiras</b>
Objetivo	Reduzir acidentes em motocicletas	Prevenir tombamento de empilhadeiras	Melhorar a estabilidade de empilhadeiras
Metodologia	Modelagem, controle, simulação com sensores inerciais e atuadores	Análise de dinâmica, desenvolvimento de algoritmo, integração de sensores, avaliação de componentes de segurança	Modelagem e simulação, análise de estabilidade, desenvolvimento de controlador MPC, protótipo em escala
Tecnologias Utilizadas	Sensores inerciais (giroscópios), atuadores, software MuJoCo e Gazebo	Sensores de inclinação, carga e altura, algoritmos de dinâmica	Controlador preditivo (MPC) protótipo em escala
Resultados	Eficácia do controlador PID na estabilização da motocicleta	Algoritmo eficaz na manutenção da estabilidade da empilhadeira	Controlador MPC eficaz na melhoria da estabilidade, evitando tombamentos
Considerações Finais	Importância do controle automático para segurança das motocicletas	Importância da função antitombamento para segurança e eficiência das operações de carga	Aumento da segurança, redução de tempos de transporte e custos operacionais

Fonte – Autoria própria

### 2.3.5 - Considerações Finais

Os três trabalhos exemplificam diferentes abordagens para resolver problemas similares em contextos variados. Eles demonstram a importância da modelagem precisa, do uso de tecnologias avançadas e da validação experimental para desenvolver sistemas de antitombamento eficazes. A integração de sensores algoritmos de controle e simulações detalhadas são elementos cruciais para o sucesso desses sistemas. Cada estudo contribui de maneira significativa para o

campo de segurança veicular, oferecendo percepções valiosas que podem ser aplicados e adaptadas a outros tipos de veículos e cenários operacionais.

A convergência dessas pesquisas destaca a importância contínua de desenvolver soluções tecnológicas avançadas para aumentar a segurança e eficiência operacional, independentemente do tipo de veículo. Em um cenário mais amplo, essas inovações têm o potencial de salvar vidas, reduzir acidentes e melhorar a eficiência operacional em diversas indústrias.

### 3 - Metodologia

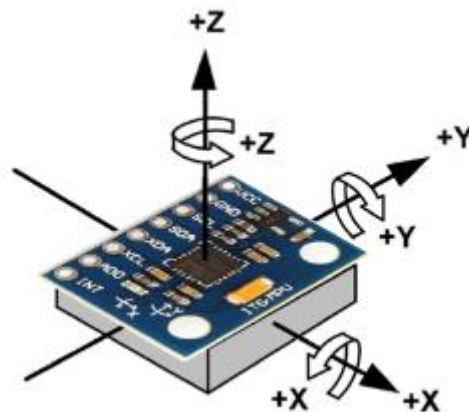
A metodologia deste trabalho descreve os métodos e procedimentos adotados para o desenvolvimento e avaliação de um sistema antitombamento para empilhadeiras. Este capítulo está organizado em seções que cobrem a seleção dos componentes, o desenvolvimento do protótipo, os métodos de coleta e análise de dados e o processo de validação do sistema.

#### 3.1 - Seleção de Componentes e Tecnologias

Para o desenvolvimento do sistema antitombamento, foram selecionados componentes e tecnologias baseados em critérios de desempenho, custo e compatibilidade.

- Sensores: A escolha dos sensores de inclinação e aceleração foi baseada na precisão e na capacidade de integração com o sistema de controle da empilhadeira. O sensor MPU-6050 conforme a figura 13, foi selecionado devido à sua alta sensibilidade e baixo custo.

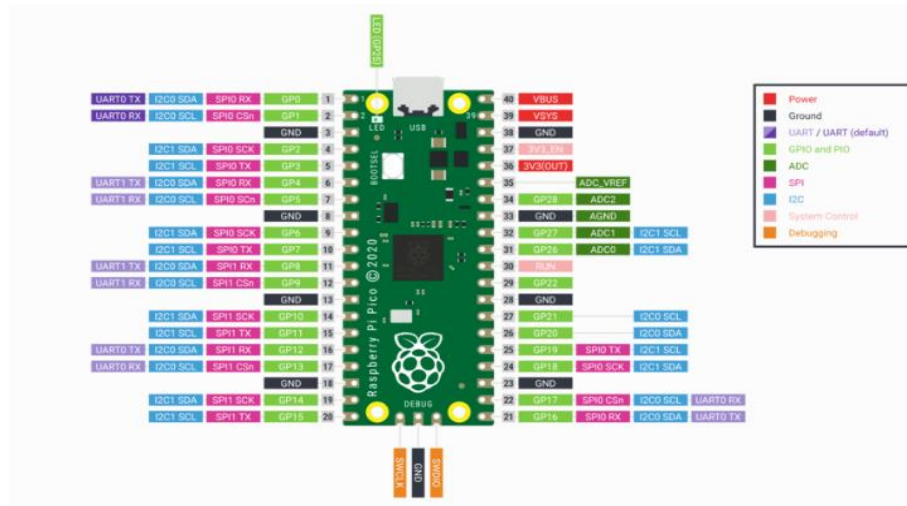
Figura 13 - Sensor MPU-6050



Fonte - HandsOn Tech (2009)

- Controlador: Um microcontrolador Raspberry Pi Pico conforme a figura 14, foi escolhido para processar os dados dos sensores e executar os algoritmos de controle devido à sua flexibilidade e facilidade de programação.

Figura 14 - Raspberry Pi Pico



Fonte - Virtual Breadboard (2023)

- Atuadores: O motor de passo Nema 17 conforme a figura 15, foi utilizado para mover o contrapeso, pois tem grande entrega de torque com baixo consumo de corrente.

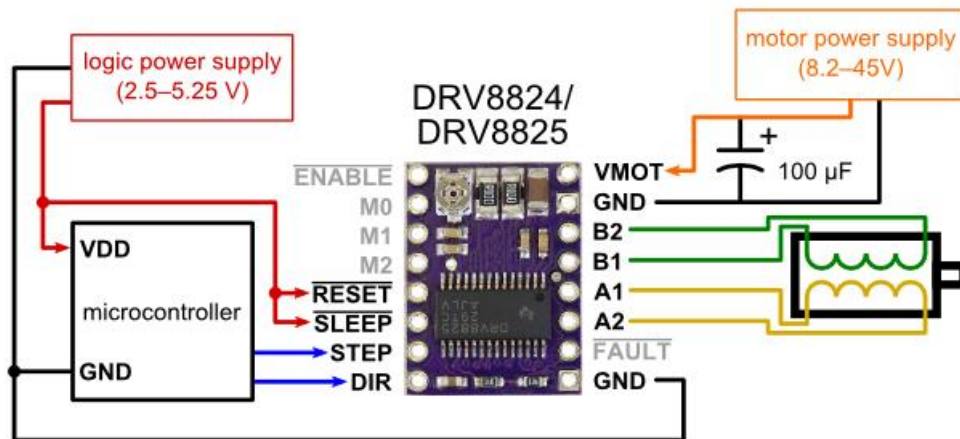
Figura 15 - Motor de passo Nema 17



Fonte – Alibaba (2024)

- Driver Pololu 8825: Conforme a figura 16, será utilizado para controlar a atuação do motor Nema 17, foi escolhido pelo baixo preço e entrega de até 2 amperes.

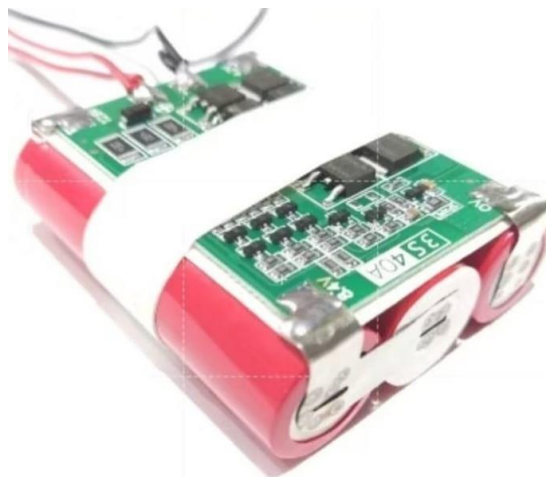
Figura 16 - Driver Pololu 8825



Fonte – Pololu (2020)

- *Pack* de bateria de 12V e 1.500mAh: Foi preciso utilizar este *pack*, pois a bateria que vem na empilhadeira é de 500mAh e 3,7V, utilizando esta bateria de 3,7 volts para alimentar o motor, a corrente que passaria pelo driver seria muito alta, ocasionando a queima dele. Também foi trocado o *pack* para poder alimentar o Raspberry Pi Pico, que trabalha com uma tensão de 5V.

Figura 17 - Pack de Bateria de 12V e 1.500mAh



Fonte – Autoria própria

- Empilhadeira de controle remoto anti-interferência de alta frequência de 2.4G e a escala de 1/24, conforme figura 18.

Figura 18 - Empilhadeira de controle remoto Forklift Truck



Fonte – AliExpress (2024)

## 3.2 – Desenvolvimento do Protótipo

O desenvolvimento do protótipo do sistema antitombamento foi uma etapa crucial do projeto, envolvendo a transição das simulações e dos conceitos teóricos para a aplicação prática. Nesta fase, buscou-se materializar as especificações definidas na concepção do sistema, realizando a montagem dos componentes, a programação do controlador e a integração dos sensores.

A implementação prática é desafiadora, pois requer a adaptação das soluções idealizadas para condições reais de operação. Este subcapítulo detalha o processo de montagem e configuração inicial do protótipo, abordando as decisões técnicas tomadas para garantir o funcionamento adequado e eficiente do sistema em um ambiente real. Além disso, são descritos os principais problemas enfrentados durante essa fase e as soluções encontradas para viabilizar a operação do protótipo.

### 3.2.1 - Escolha da Empilhadeira de Controle Remoto

A escolha da empilhadeira de controle remoto foi uma etapa fundamental para o desenvolvimento do protótipo do sistema antitombamento. Dada a natureza do projeto, que envolve a implementação de sensores e algoritmos de controle para a

correção automática da estabilidade, era necessário utilizar um modelo de empilhadeira que permitisse flexibilidade na integração de componentes adicionais, como o sensor de inclinação e aceleração, o driver e o motor de passo, e que oferecesse controle preciso das suas funções de movimentação.

### 3.2.2 - Critérios de Seleção

A seguir, são apresentados os principais critérios utilizados para a escolha da empilhadeira:

- **Facilidade de Modificação:** A empilhadeira escolhida deveria permitir a adição de sensores e outros componentes eletrônicos sem comprometer a sua operação básica. Isso inclui a disponibilidade de pontos de fixação e acesso ao sistema de controle interno.
- **Capacidade de Controle Remoto:** Era essencial que o modelo selecionado oferecesse a funcionalidade de controle remoto, o que permitiu realizar testes de estabilidade e manobras em diferentes cenários simulados sem a necessidade de intervenção direta de um operador.
- **Tamanho e Escala Adequados:** Para simplificar o desenvolvimento do protótipo e reduzir custos, optou-se por uma empilhadeira em escala reduzida (modelo de controle remoto) que replicasse de forma fiel o comportamento de uma empilhadeira real, incluindo características de estabilidade, manobrabilidade e distribuição de peso.

### 3.2.3 - Modelo Selecionado

Após uma análise das opções disponíveis no mercado, foi selecionada uma empilhadeira de controle remoto *Forklift Truck* da empresa Landi Toys Co. Ltd., devido às suas características que melhor se adequam aos requisitos do projeto. Esse modelo possui as seguintes vantagens:

- **Compatibilidade com Modificações:** A *Forklift Truck* permite fácil acesso aos seus componentes internos, facilitando a integração do sensor, driver, motor de passo e *pack* de baterias.

- **Precisão no Controle Remoto:** O sistema de controle remoto do modelo oferece uma precisão adequada para simular as manobras e condições de operação de uma empilhadeira real, o que é crucial para a realização de testes de estabilidade.
- **Dimensões e Peso Ajustados:** O tamanho compacto e a distribuição de peso são adequados para replicar as dinâmicas de tombamento que seriam encontradas em empilhadeiras em tamanho real, permitindo uma validação mais eficiente do sistema antitombamento.

### **3.2.4 - Justificativa da Escolha**

A escolha da empilhadeira *Forklift Truck* justifica-se pela necessidade de um modelo que permita simular condições reais de operação e estabilidade, ao mesmo tempo em que ofereça flexibilidade para a instalação dos componentes necessários ao desenvolvimento do protótipo. Além disso, o controle remoto integrado facilita a condução de experimentos, permitindo ajustes rápidos nas condições de teste.

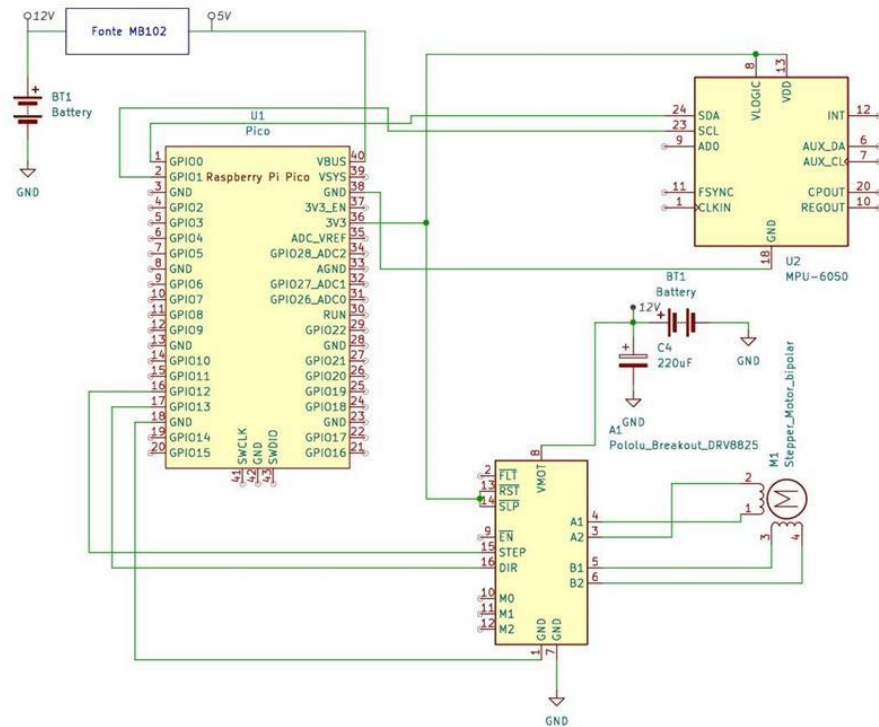
Com a empilhadeira de controle remoto selecionada, foi possível iniciar a montagem do protótipo e realizar os primeiros testes de integração dos sensores e atuadores, conforme descrito nas seções seguintes deste trabalho.

### **3.2.5 - Confeção da Placa de Circuito Impresso**

A confecção de uma placa de circuito impresso (PCB) foi uma etapa essencial para integrar os diferentes componentes do sistema antitombamento da empilhadeira em um protótipo funcional e compacto. A PCB projetada incorpora os seguintes componentes: um Raspberry Pi Pico como unidade de controle, um MPU6050 para detecção de inclinação e aceleração, um driver 8825 para controle de motor e uma fonte MB102 para alimentação.

O primeiro passo para a confecção, foi definir as conexões e as necessidades de cada componente para garantir uma operação integrada e eficiente. Usou-se o software KiCAD para desenhar o esquema elétrico da placa. O diagrama incluiu as conexões ilustradas na Figura 19.

Figura 19 - Esquema elétrico



Fonte – Autoria própria

Com o esquema concluído, passou-se à etapa de layout da PCB, o professor doutor Edson Caoru Kitani, orientador do trabalho, fez todo desenvolvimento do *layout* da PCB, impressão em placa de fenolite e corrosão percloroato de ferro. O *design* foi otimizado para manter o tamanho da placa o mais compacto possível. Na Figura 20 podemos ver a disposição dos componentes na PCB.

Figura 20 - Componentes na placa PCB



Fonte – Autoria própria

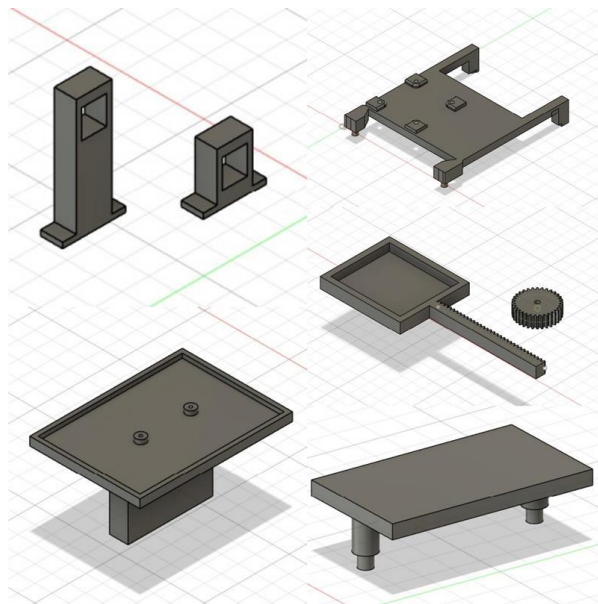
### 3.2.6 - Modelagem e Impressão 3D do Sistema de Contrapeso

A modelagem e a impressão 3D do sistema de contrapeso desempenharam um papel importante no desenvolvimento do sistema antitombamento da empilhadeira. Este processo permitiu não apenas a criação de um protótipo físico funcional, mas também ajustes rápidos e precisos no design, de modo a garantir que o contrapeso atendesse às especificações de estabilidade e segurança.

Para a modelagem 3D, utilizou-se o software Fusion 360, que permite criar projetos detalhados e realizar simulações estruturais e de peso. A escolha desse software foi baseada na sua facilidade de uso e na capacidade de exportar os arquivos diretamente para a impressora 3D.

A impressão foi realizada utilizando uma impressora 3D e o material selecionado para o contrapeso foi o filamento PLA (Polylactic Acid), devido à sua durabilidade, rigidez e baixo custo. Na Figura 21 visualizamos os componentes impressos.

Figura 21 - Peças impressas em 3D



Fonte – Autoria própria

### 3.2.7 - Resultados da Modelagem e Impressão

A peça impressa em 3D atendeu às expectativas em termos de precisão dimensional e robustez. Os testes iniciais realizados, demonstraram que o sistema de contrapeso foi capaz de manter a estabilidade da empilhadeira nas condições simuladas de carga e inclinação.

O uso da impressão 3D proporcionou a vantagem de ajustes rápidos no design, permitindo a otimização da estrutura em relação ao peso e à resistência. Adicionalmente, a combinação do PLA e o uso do pack de baterias como peso, resultou em um contrapeso eficiente, simulando de maneira eficaz o comportamento de um contrapeso em escala real.

### 3.2.8 - Vantagens da Impressão 3D no Desenvolvimento do Protótipo

O processo de impressão 3D permitiu uma série de vantagens no desenvolvimento do sistema de contrapeso:

- Rapidez no desenvolvimento: A prototipagem rápida proporcionada pela impressão 3D reduziu significativamente o tempo necessário para construir e testar várias iterações do design.
- Custo-benefício: O uso de PLA e a impressão 3D resultaram em um processo econômico, comparado a métodos tradicionais de fabricação.
- Flexibilidade de design: A impressão 3D possibilitou modificações no projeto de maneira ágil, permitindo ajustes e otimizações durante o desenvolvimento.

### 3.2.9 - Considerações Finais

A modelagem e impressão 3D do sistema de contrapeso provaram ser uma solução eficaz e viável para o desenvolvimento do protótipo do sistema antitombamento da empilhadeira. O uso de simulações e prototipagem rápida permitiu o ajuste fino das características de peso e estabilidade, garantindo um desempenho satisfatório nos testes iniciais. Com isso, o sistema de contrapeso impresso em 3D proporcionou uma base sólida para a validação do sistema antitombamento proposto.

### 3.3 - Desenvolvimento da Programação

Para o desenvolvimento do software de controle do sistema antitombamento da empilhadeira, foi utilizada a IDE (*Integrated Development Environment*) Thonny com a linguagem *MicroPython*. O uso de *MicroPython* facilitou a programação e o gerenciamento do sensor de movimento MPU6050, permitindo que o sistema identificasse mudanças de inclinação em tempo real e acionasse o contrapeso móvel sempre que detectado risco de tombamento.

Duas bibliotecas foram essenciais para o desenvolvimento: *vector3D.py* e *imu.py*. Essas bibliotecas simplificaram o processo de obtenção e manipulação dos dados do sensor MPU6050, com foco nos valores de giroscópio e aceleração no eixo X do sensor, essenciais para o controle da estabilidade do protótipo.

A biblioteca *vector3D.py* contém funções para manipulação de vetores tridimensionais, facilitando o cálculo do ângulo de inclinação com base nos dados de aceleração e velocidade de rotação.

A biblioteca `imu.py` gerencia a leitura dos dados de giroscópio e aceleração do sensor MPU6050. Através dela, o sistema coleta continuamente os dados do eixo X do sensor, para monitorar a inclinação e a velocidade de rotação. Esses dados servem de entrada para o controle do contrapeso móvel, ajustando-o conforme necessário para manter a estabilidade.

### 3.3.1 - Estrutura do Programa

O código foi estruturado para monitorar o comportamento da empilhadeira em tempo real, usando os dados de giroscópio e aceleração no eixo X do sensor. Quando detectada uma inclinação que sugira risco de tombamento, o programa aciona o contrapeso para corrigir o centro de gravidade. Na Figura 22 são detalhadas as etapas principais do programa:

- Coleta de dados do giroscópio e aceleração: Utilizando `imu.py`, o programa coleta dados de velocidade de rotação e aceleração especificamente no eixo X do sensor. Esses dados são processados pelo raspberry pi pico que determina se a empilhadeira está próxima ao limite seguro.
- Processamento e identificação de tombamento: O código compara a aceleração e velocidade de rotação com um valor de referência (definido empiricamente). Caso o limite seja ultrapassado, é identificado um possível risco de tombamento, acionando o contrapeso móvel para corrigir a inclinação.
- Controle do contrapeso: Através do driver do motor, o programa ajusta o contrapeso móvel para contrabalançar a inclinação, deslocando-o para a traseira da empilhadeira. Esse ajuste ajuda a estabilizar a empilhadeira e reduz o risco de acidente.
- Laço contínuo: O programa é executado em um laço contínuo, monitorando os dados do sensor em tempo real. Esse laço permite que o sistema reaja rapidamente a inclinações inesperadas ou mudanças de carga.

Figura 22 - Programa principal

```

467 while True:
468
469     ax=round(imu.accel.x,2)
470     ay=round(imu.accel.y,2)
471     az=round(imu.accel.z,2)
472     gx=round(imu.gyro.x)
473     gy=round(imu.gyro.y)
474     gz=round(imu.gyro.z)
475
476     if ax <= -0.1 and gx <= -7:
477         flag = 1
478
479     if flag == 1 and i <= 84:
480         DIR.value(1)
481         STEP.value(1)
482         STEP.value(0)
483         i = i + 1
484         sleep_ms(20)
485
486     if ax >= 0.06 and gx >= 3:
487         flag = 0
488
489     if flag == 0 and i >= 1:
490         DIR.value(0)
491         STEP.value(1)
492         STEP.value(0)
493         i = i - 1
494         sleep_ms(20)

```

Fonte – Autoria Própria

### 3.3.2 - Resultados e Considerações

A programação desenvolvida permitiu uma resposta rápida e eficiente ao risco de tombamento, utilizando os dados de giroscópio e aceleração no eixo X para monitorar a inclinação da empilhadeira. O código foi testado em diferentes cenários, mostrando-se capaz de detectar rapidamente inclinações perigosas e ajustar o contrapeso de maneira eficaz.

Durante os testes, a empilhadeira foi capaz de suportar cargas maiores e se manteve estável em diferentes tipos de terrenos, o que confirma a eficácia do sistema programado. O uso das bibliotecas `vector3D.py` e `imu.py` foi essencial para simplificar o desenvolvimento, permitindo que o sistema coletasse e processasse os dados de inclinação e rotação sem necessidade de cálculos complexos adicionais.

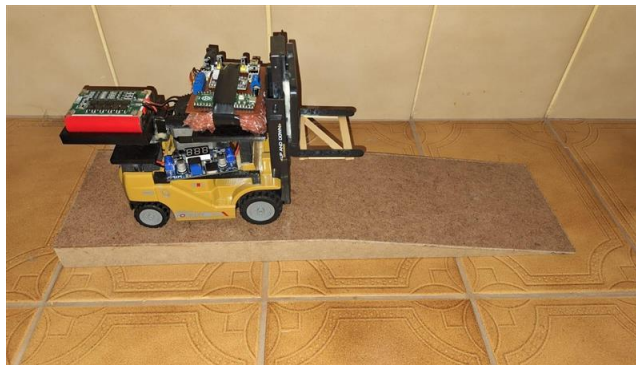
## 4 - Testes e Resultados

Este capítulo apresenta os testes realizados para avaliar o desempenho do sistema antitombamento aplicado à empilhadeira em diferentes cenários. O objetivo foi verificar a eficiência do contrapeso móvel em melhorar a capacidade de carga e a estabilidade da empilhadeira, tanto em superfícies planas quanto inclinadas.

### 4.1 - Estrutura e Condições de Teste

Para os testes, foi construída uma estrutura de madeira composta por uma superfície plana de 30 cm e uma rampa inclinada de 30 cm com um ângulo de inclinação de 3,7 graus conforme a Figura 23. Esse ambiente simula condições reais de operação em que a empilhadeira poderia ser submetida tanto a movimentos em áreas niveladas quanto em inclinações leves, permitindo avaliar a estabilidade em ambas as situações.

Figura 23 - Rampa para testes



Fonte – Autoria própria

### 4.2 - Descrição dos Testes Realizados

Os testes foram conduzidos com duas configurações principais da empilhadeira:

- Empilhadeira sem contrapeso: Testada tanto no plano quanto na rampa, avaliando a quantidade de carga máxima que pode ser suportada sem o uso do sistema de contrapeso móvel.

- Empilhadeira com contrapeso móvel: Testada nas mesmas condições para verificar o ganho de estabilidade e capacidade de carga com o sistema de contrapeso implementado.

Em cada teste, o peso foi incrementado gradualmente até o ponto em que a empilhadeira perdeu estabilidade e começou a tombar. Esse limite foi registrado como o valor máximo de carga suportada.

### 4.3 - Resultados dos Testes

A seguir, estão os resultados dos testes realizados, organizados em duas seções: plano e rampa.

#### 4.3.1 - Testes no Plano

Empilhadeira sem contrapeso no plano:

- Carga máxima suportada: 354 gramas
- Descrição: A empilhadeira, sem contrapeso adicional, manteve-se estável até uma carga de 354 gramas. Após esse limite, começou a apresentar sinais de instabilidade e tombamento. Esse valor indica a capacidade máxima da empilhadeira em condições planas.

Empilhadeira com contrapeso móvel no plano:

- Carga máxima suportada: 629 gramas
- Descrição: Com o contrapeso móvel instalado, a empilhadeira suportou uma carga significativamente maior, chegando a 629 gramas. O sistema de contrapeso se ajustou dinamicamente, redistribuindo o centro de gravidade e permitindo uma capacidade de carga quase 80% maior do que a configuração sem contrapeso.

#### 4.3.2 - Testes na Rampa

Empilhadeira sem contrapeso na rampa:

- Carga máxima suportada: 265 gramas
- Descrição: Na condição inclinada, a empilhadeira sem contrapeso apresentou uma capacidade de carga reduzida, suportando apenas 265 gramas. A inclinação aumentou o risco de tombamento devido à alteração do centro de gravidade, limitando sua estabilidade e capacidade de carga.

Empilhadeira com contrapeso móvel na rampa:

- Carga máxima suportada: 515 gramas
- Descrição: Com o contrapeso móvel, a empilhadeira suportou uma carga de até 515 gramas na rampa, um aumento significativo de quase 95% em relação à configuração sem contrapeso. O contrapeso móvel foi eficaz em redistribuir o centro de gravidade na inclinação, garantindo maior estabilidade.

#### **4.4 - Análise dos Resultados**

Os testes demonstraram que o sistema de contrapeso móvel aumentou significativamente a capacidade de carga e a estabilidade da empilhadeira, tanto em condições planas quanto inclinadas.

No plano, a empilhadeira com contrapeso móvel suportou 275 gramas a mais do que sem o contrapeso, um incremento de aproximadamente 78%.

Na rampa, o contrapeso móvel proporcionou uma melhoria ainda maior, permitindo um aumento de 250 gramas, cerca de 94% de acréscimo na capacidade de carga.

Os resultados mostram que o contrapeso móvel foi particularmente benéfico em superfícies inclinadas, onde o risco de tombamento é naturalmente maior devido ao deslocamento do centro de gravidade. Esse sistema de contrapeso, ao se ajustar de acordo com a posição da empilhadeira, oferece uma solução eficiente para aumentar a estabilidade e a segurança da operação.

#### **4.5 - Considerações Finais**

Os testes confirmam a eficácia do sistema de contrapeso móvel no aumento da capacidade de carga e da estabilidade da empilhadeira em diferentes condições de terreno. Com isso, o sistema antitombamento se mostra uma solução viável para melhorar a segurança operacional de empilhadeiras, reduzindo o risco de acidentes relacionados ao tombamento e aumentando sua eficiência em ambientes variados.

## **5 – Conclusão**

O desenvolvimento do sistema anti-tombamento para empilhadeiras demonstrou-se uma solução eficaz para melhorar a estabilidade e a segurança na operação de equipamentos industriais. Este trabalho teve como principal objetivo criar um sistema baseado em sensores e controle de contrapeso que fosse capaz de detectar inclinações críticas e redistribuir automaticamente o peso, reduzindo o risco de acidentes.

### **5.1 - Síntese dos Resultados**

Ao longo do projeto, foram implementados e testados diversos componentes que, integrados, formaram o sistema antitombamento. A programação, desenvolvida em MicroPython e testada na IDE Thonny, mostrou-se capaz de captar, interpretar e reagir rapidamente a dados fornecidos pelo sensor MPU6050, utilizando as bibliotecas `vector3D.py` e `imu.py` para analisar a velocidade de giro e a aceleração. Durante os testes, a empilhadeira equipada com o sistema de contrapeso móvel conseguiu suportar cargas significativamente maiores, tanto em superfícies planas quanto em rampas, do que uma empilhadeira sem o sistema antitombamento. Esses resultados confirmam a viabilidade do projeto e a sua contribuição para a segurança operacional de empilhadeiras.

### **5.2 - Limitações e Desafios**

Apesar dos resultados positivos, algumas limitações foram identificadas. O sistema atual depende de parâmetros fixos para acionar o contrapeso, e esses parâmetros podem variar conforme as condições de uso, como a carga da empilhadeira e o tipo de superfície. Além disso, a estrutura do protótipo, feita de materiais simplificados para reduzir custos, limitou testes mais robustos em situações adversas, como inclinações extremas e terrenos acidentados.

### **5.3 - Recomendações para Trabalhos Futuros**

Para aperfeiçoar o sistema antitombamento e ampliar seu potencial de aplicação em condições reais, recomenda-se:

- Ajuste dinâmico dos parâmetros de controle: Implementar algoritmos adaptativos que ajustem os parâmetros de acordo com a carga e o tipo de terreno, aumentando a precisão da resposta do sistema.
- Desenvolvimento de um sistema de *feedback*: Incluir um sistema de feedback visual ou sonoro que alerte o operador sobre condições críticas de inclinação, auxiliando na prevenção de acidentes.
- Testes em empilhadeiras reais: Realizar testes em empilhadeiras de tamanho real, em ambientes de operação industrial, para avaliar a eficácia do sistema em condições de uso real.
- Integração de outros sensores: Considerar o uso de sensores adicionais, como giroscópios de alta precisão e sensores de peso, que poderiam contribuir para a melhoria da coleta de dados e permitir uma análise mais abrangente das condições operacionais.

#### **5.4 Contribuições do Trabalho**

Este trabalho contribuiu significativamente para o desenvolvimento de soluções voltadas para a segurança de empilhadeiras, explorando uma tecnologia inovadora de controle de contrapeso. O protótipo desenvolvido mostrou-se eficaz em melhorar a estabilidade do equipamento e em oferecer uma resposta rápida a situações de tombamento iminente. Além disso, este projeto abre novas possibilidades de pesquisa e desenvolvimento na área de segurança operacional e prevenção de acidentes, com o potencial de reduzir riscos e melhorar a eficiência de operações industriais.

#### **5.5 Considerações Finais**

A criação de um sistema antitombamento eficaz representa um importante avanço na proteção de operadores de empilhadeiras e na prevenção de acidentes em ambientes industriais. O trabalho realizado confirma que a tecnologia de controle de contrapeso, aliada a sensores de aceleração e algoritmos de resposta rápida, pode ser aplicada com sucesso a equipamentos pesados. Embora haja espaço para melhorias e refinamentos, o sistema desenvolvido é um passo significativo em direção a soluções de segurança mais robustas e automatizadas, proporcionando um ambiente de trabalho mais seguro e eficiente.

## Referências Bibliográficas.

- AHM. (01 de Fevereiro de 2001). *AHM Solution*. Fonte: AHM The new handling concept: <https://www.ahmsolution.com.br/>
- BERMEJO, J. F. (13 de Abril de 2018). Design of a counterbalance forklift based on a predictive anti-tip-over controller. *GalleyProof*, p. 16.
- CASKA, J. (05 de Janeiro de 2023). *Virtual Breadboard*. Fonte: Virtual Breadboard: <https://manual.virtualbreadboard.com/components/edgeyavatars/raspberrypi-pico/raspberrypi-pico.html>
- COMPANY, J. H. (02 de Fevereiro de 1968). *John Harder & Company Specialists in Custom Material Handling*. Fonte: John Harder & Company: <https://johnharderco.com/>
- CLARK, (2024). *Sistema de anti tombamento para empilhadeiras*. Fonte: Clark Empilhadeiras: [www.clarkempilhadeiras.com.br](http://www.clarkempilhadeiras.com.br)
- FRANZON, J. (20 de Fevereiro de 2020). Algorithm for Anti-Tip Over Function. *Faculty of Engineering, Lund University*, p. 42.
- GHENO, Simoni Maria; Souza, Ranielle Barbosa; Moschegni, Luana Caroline; Gouvêa Duarte, Marcello Cláudio. (28 de Setembro de 2022). MODELAGEM E CONTROLE CONCEITUAL DE UM SISTEMA ANTI- QUEDA EM VEÍCULOS DE DUAS RODAS. *Simpósio de Tecnologia da Fatec Sertãozinho*, p. 9.
- LEXICAR. (5 de Fevereiro de 2024). *LEXICAR Brasil*. Fonte: LEXICAR Brasil: [www.lexicarbrasil.com.br/hyster/](http://www.lexicarbrasil.com.br/hyster/)
- LOGPYX. (Dezembro de 2020). *Logpyx*. Fonte: Logpyx: <https://logpyx.com/acidentes-com-empilhadeiras-e-como-evitar/>
- NETMAK. (Janeiro de 2020). *Netmak, empilhadeiras e peças*. Fonte: NetMak: <https://www.netmak.com.br/a-revolucao-industrial-sobre-rodas-conheca-a-historia-das-empilhadeiras>
- OSST. (Janeiro de 2024). *SmartLab*. Fonte: SmartLab: <https://smartlabbr.org/sst>
- POLOLU. (05 de Janeiro de 2000). *Pololu Robotics & Electronics*. Fonte: Pololu: <https://www.pololu.com/>
- SILVA, C. (Fevereiro de 2020). *CTS Silva*. Fonte: CTS Silva: <https://www.ctssilva.com.br/entendendo-o-centro-de-carga>
- SOBOLEWSKI, N. (12 de maio de 2012). *Norbertsobolewski*. Fonte: Dreamstime: [https://pt.dreamstime.com/norbertsobolewski\\_info](https://pt.dreamstime.com/norbertsobolewski_info)

SUNBELT. (01 de Janeiro de 2024). *Sunbelt Rentals*. Fonte: Sunbelt Rentals:  
<https://www.sunbeltrentals.com>

TECCH, H. (20 de janeiro de 2009). *Sensor MPU-6050*. Fonte: HandsOn Tech Open  
Source Eletronics Platform: <https://handsontec.com/>