



**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE ROBÔ MÓVEL
INTELEGENTE PARA TRANSPORTE DE MATERIAL EM AMBIENTE
INDOOR**

Marivan Silva Gomes

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos – Mestrado Profissional, PPGEP/ITEC, da Universidade Federal do Pará, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos.

Orientador: Jandecy Cabral Leite

Belém

Outubro de 2021

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTOTIPO DE ROBÔ MÓVEL
INTELEGENTE PARA TRANSPORTE DE MATERIAL EM AMBIENTE
INDOOR**

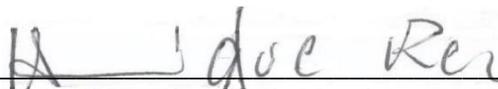
Marivan Silva Gomes

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA PROCESSOS – MESTRADO PROFISSIONAL (PPGEP/ITEC) DA UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM ENGENHARIA DE PROCESSOS.

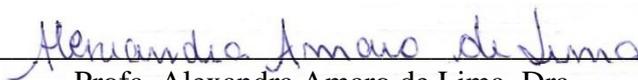
Examinada por:



Prof. Jandecy Cabral Leite, Dr.
(PPGEP/ITEC/UFGA-Orientador)



Prof. Manoel Henrique Reis Nascimento, Dr.
(PPGEP/ITEC/UFGA-Membro)



Profa. Alexandra Amaro de Lima, Dra.
(ITEGAM-Membro)

BELÉM, PA - BRASIL

OUTUBRO DE 2021

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFPA

Gomes, Marivan Silva, 1968-
Desenvolvimento de um protótipo de robô móvel
inteligente para transporte de material em ambiente indoor /
Marivan Silva Gomes – 2021.

Orientador: Jandecy Cabral Leite

Dissertação (Mestrado Profissional) - Universidade Federal
do Pará. Instituto de Tecnologia. Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Processos, 2021.

1. Engenharia de controle e automação 2. Robótica móvel
3. Robôs inteligentes 4. Beacons 5. Robôs moveis autônomos.
I. Título

CDD 670.42

*Dedico este trabalho ao meu querido pai
Antenor Correa Gomes e a minha mãe
Maria da Conceição Silva Gomes.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela graça de ter alcançado mais este grande objetivo em minha vida.

Ao meu pai in memoriam Antenor Correa Gomes; A minha mãe Maria da Conceição Silva Gomes, por terem me dado todas as condições e todos os incentivos para me aprofundar nos estudos e seguir meus sonhos.

Ao meu professor orientador, Dr. Jandecy Cabral Leite, pela sua paciência e incalculáveis horas disponibilizadas para a revisão, suporte no programa matemático e orientação no decorrer deste trabalho.

Aos professores e colegas do PPGEP e do ITEGAM, que disponibilizaram todos os recursos possíveis para tornar este desafio mais fácil de ser concluído.

E agradeço aos meus amigos LEIDO JANDER, RAILMA LIMA DE PAULA e MARCELO MAIA NASCIMENTO, bem como a todos os outros que indiretamente contribuíram para a realização desse projeto.

“Ele não sabia que era impossível... foi lá e fez.”

(Jean Cocteau)

Resumo da Dissertação apresentada ao PPGEP/UFPA como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Processos (M. Eng.)

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTOTIPO DE ROBÔ MÓVEL
INTELEGENTE PARA TRANSPORTE DE MATERIAL EM AMBIENTE
INDOOR**

Marivan Silva Gomes

Outubro/2021

Orientador: Jandecy Cabral Leite

Área de Concentração: Engenharia de Processos

Esta dissertação está concentrada nos métodos, técnicas e ferramentas para auxiliar o desenvolvimento de produtos e robôs que necessitam trabalhar com precisão de localização em ambientes indoor, além de apresentar as principais tecnologias relacionadas ao tema, com suas respectivas vantagens, desvantagens, desafios. E por fim será proposto e desenvolvido um protótipo de um robô móvel. Os veículos autoguiados tornaram-se parte da indústria 4.0. A Quarta Revolução está presente em todas as etapas de fabricação de um produto, com benefícios para segurança, rentabilidade, qualidade, montagem e bem-estar do trabalhador. Os robôs moveis inteligentes tem a capacidade de se movimentarem em lugares pré-determinados, de forma autônoma e sem correr o risco de se chocarem com outros robôs ou pessoas, sendo capazes de reprogramar suas trajetórias, não havendo mais a necessidade de colocação de marcadores ao longo d seu percurso. São capazes de transportar cargas pesadas, de realizar tarefas insalubres podendo trabalhar 24 horas por dia, 7 dias por semana.

Abstract of Dissertation presented to PPGE/UFPA as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master in Process Engineering (M. Eng.)

**DEVELOPMENT OF A PROTOTYPE OF A SMART MOBILE ROBOT FOR
TRANSPORTING MATERIAL IN INDOOR ENVIRONMENT**

Marivan Silva Gomes

October/2021

Advisor: Jandecy Cabral Leite

Research Area: Process Engineering

This dissertation is focused on methods, techniques and tools to assist the development of products and robots that need to work with precision in indoor environments, besides presenting the main technologies related to the subject, with their respective advantages, disadvantages, challenges. Finally, a prototype of a mobile robot will be proposed and developed. Self-driving vehicles have become part of Industry 4.0. The Fourth Revolution is present in all stages of manufacturing a product, with benefits for safety, profitability, quality, assembly and worker well-being. Intelligent mobile robots have the ability to move in predetermined places, autonomously and without running the risk of colliding with other robots or people, being able to reprogram their trajectories, no longer having the need to place markers when along its route. They are able to carry heavy loads, carry out unhealthy tasks and work 24 hours a day, 7 days a week.

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - CONTEXTO.....	6
1.2 - DEFINIÇÃO DO PROBLEMA.....	6
1.3 - MOTIVAÇÃO.....	8
1.4 - OBJETIVOS.....	9
1.4.1 - Objetivo geral.....	9
1.4.2 - Objetivos específicos.....	9
1.5 - ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....	10
CAPÍTULO 2 - REVISÃO DA LITERATURA.....	11
2.1 - TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO.....	11
2.2 - IDENTIFICAÇÃO DIRETA.....	11
2.3 - AQUISIÇÃO DE TEMPO.....	11
2.4 - SISTEMA DE POSICIONAMENTO OUTDOOR.....	12
2.5 - O QUE FAZ UM GPS.....	12
2.6 - SISTEMA DE POSICIONAMENTO INDOOR.....	14
2.6.1 - Posicionamento magnético.....	14
2.6.2 - Sistemas inerciais.....	15
2.6.3 - Tecnologia Wireless.....	15
2.6.4 - Wifi.....	17
2.6.5 - Bluetooth.....	18
2.6.6 - ZigBee.....	20
2.6.7 - RSSI	21
2.7 - TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO.....	22
2.7.1 - Proximidade.....	22
2.7.2 - Triangulação.....	24
2.7.3 - Trilateração.....	25
2.7.4 - Fingerprinting.....	25
2.7.5 - Bluetooth Low Energy.....	26
2.7.6 - Beacons.....	26
2.8 - CONTROLE DE PID (PROPORCIONAL, INTEGRAL E DERIVATIVO)	27
2.8.1 - Definição das terminologias de controle.....	27

2.8.2 - Resposta proporcional.....	29
2.8.3 - Resposta Integral.....	29
2.8.4 - Derivada de resposta.....	29
2.8.5 - Ajuste.....	30
CAPÍTULO 3 - METODOLOGIA.....	32
CAPÍTULO 4 - MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
4.1 - DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO.....	36
4.2 - PWM PARA CONTROLE DOS MOTORES DO ROBÔ.....	39
4.3 - CONTROLANDO OS MOTORES ATRAVÉS DE PID.....	41
CAPÍTULO 5 - RESULTADOS.....	43
5.1 - MODELO MATEMÁTICO.....	47
5.2 - SEGUINDO UMA TRAJETÓRIA.....	50
5.3 - TESTE DE VALIDAÇÃO.....	52
CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES.....	54
5.1 - CONCLUSÕES.....	54
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	55

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1	Layout da fábrica transire.....	7
Figura 1.2	Transporte de materiais/insumos dentro da fábrica.....	7
Figura 1.3	Protótipo do robô autoguiado a ser desenvolvido.....	9
Figura 2.1	Acelerômetro e giroscópio de 3 eixos MPU – 6050.....	15
Figura 2.2	Classificação das redes sem fio.....	17
Figura 2.3	Topologias bluetooth.....	19
Figura 2.4	Configuração bluetooth dependendo da conexão.....	19
Figura 2.5	Modulo Xbee Zigbee.....	20
Figura 2.6	Construção das topologias de rede ZigBee.....	21
Figura 2.7	Localização por proximidade, monitorização por pontos.....	23
Figura 2.8	Técnica de triangulação.....	24
Figura 2.9	Trilateração.....	25
Figura 2.10	Resposta de uma fonte de PID de malha fechada.....	28
Figura 4.1	Diagrama de fluxo, ilustração do problema.....	33
Figura 4.2	Circuito eletrônico do Arduino com o LCD.....	36
Figura 4.3	Código fonte para escrita no LCD.....	37
Figura 4.4	LCD mostrando as informações obtidas do Beacon.....	37
Figura 4.5	Circuito eletrônico com Arduino para controle dos motores.....	38
Figura 4.6	Código fonte para controle dos motores.....	38
Figura 4.7	Gráfico da largura de pulso.....	39
Figura 4.8	Ligação elétrica entre o Arduino com o módulo Sabertooth.....	40
Figura 4.9	Código em C para controle PWM dos pinos do Arduino.....	40
Figura 4.10	Planta de controle PID.....	41
Figura 4.11	Código fonte do controlador PID.....	42
Figura 5.1	Interação do robô com o ambiente.....	44
Figura 5.2	Cálculo da trajetória do robô.....	45
Figura 5.3	Robô poderá assumir diferentes ângulos durante a sua trajetória	45
Figura 5.4	Angulo elevado levando instabilidade no percurso do robô.....	46
Figura 5.5	Instabilidade na navegação do robô.....	46
Figura 5.6	Controle PID para estabilização do sistema.....	46
Figura 5.7	Desenho do robô com distância entre rodas.....	47

Figura 5.8	Modelo matemático do robô ARM.....	47
Figura 5.9	Modelo matemático para o veículo robô de duas rodas.....	48
Figura 5.10	Gráfico mostrando a saída do modelo matemático.....	49
Figura 5.11	Robô ARM seguindo uma trajetória.....	50
Figura 5.12	Modelo matemático com controlador PI.....	51
Figura 5.13	Gráfico de saída do robô com trajetória.....	52
Figura 5.14	Beacon instalado no robô.....	52
Figura 5.15	Teste de validação.....	53

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Quadro comparativo IEEE 802.11.....	18
Tabela 2.2	Ajuste de um controlador usando o método Ziegler-Nichols.....	31
Tabela 4.1	Listas de materiais utilizados para construção do protótipo.....	34
Tabela 4.2	Ferramentas de software utilizadas.....	35
Tabela 4.3	Linguagem para programação do Arduino mega.....	36
Tabela 5.1	Coordenadas cartesianas para teste do robô.....	51

NOMENCLATURA

AMR	AUTOMATIC MOBILE ROBOT
BLE	BLUETOOTH LOW ENERGY
GLONASS	RUSSIAN GLOBAL NAVIGATION SATELLITE SYSTEM
GPS	GLOBAL POSITIONING SYSTEM
IDE	INTEGRATED DEVELOPMENT ENVIRONMENT
IoT	INTERNET OF THINGS
IrDA	INFRARED DATA ASSOCIATION
ISM	INDUSTRIAL SCIENTIFIC END MEDICAL
LED	LIGHT-EMITTING DIODE
LCD	LIQUID CRYSTAL DISPLAY
PID	PROPORTIONAL, INTEGRAL, DERIVATIVO
PWN	PULSE-WIDTH MODULATION
RFID	RADIO FREQUENCY IDENTIFICATION
ROI	RETORNO SOBRE INVESTIMENTO
RSSI	RECEIVED SIGNAL STRENGTH INDICATION
R&D	RESEACH AND DEVELOPED
Td	DERIVATIVED TIMER
TDoA	TIMES – DIFFERENCE OF ARRIVAL
ToA	TIME OF ARRIVAL
Wifi	WIRELESS FIDELITY
WLANs	WIRELESS LOCAL AREA NETWORK
WMANs	WIRELESS METROPOLITAN AREA NETWORK
WPANs	WIRELESS PERSONAL AREA NETWORK
WSN	WIRELESS SENSOR NETWORKS
WWANs	WIRELESS WIDE AREA NETWORK

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A Indústria 4.0 está sendo responsável por transformar toda a cadeia produtiva, a utilização de robôs tem trazido diversos benefícios. Os robôs são recomendados para a realização de tarefas padronizadas e que dependem de um número limitado de variáveis, sendo apropriados para executar o atendimento de demandas massivas (STRANDHAGEN, 2017).

A utilização de robôs nas indústrias traz como resultado a redução de falhas e do tempo de processamento das atividades de produção, gerando economia nos custos. As inovações da robótica têm rápida instalação e grande flexibilidade para trocas de função ou ajustes da quantidade de operadores (KAH *et al.*, 2015).

Os robôs podem ser utilizados em atividades insalubres e perigosas, o que permite que os funcionários coordenem as tarefas de um local seguro, sem correr riscos para a saúde. Além disso, ao executar as tarefas mecânicas e repetitivas, permitem que os funcionários foquem o atendimento humano em questões mais complicadas e que requerem maior discernimento, realizando atividades mais complexas do que as que, hoje, constituem a maior parte de suas demandas (HODSON e; SULLIVAN, 2012).

Os robôs do tipo colaborativos, conhecidos com o nome de COBOTS, são projetados e desenvolvidos para trabalharem em colaboração com pessoas e cuidar das atividades pesadas e/ou repetitivas, enquanto as pessoas se dedicam às atividades motoras e detalhadas, que requerem atenção e discernimento. Além disto, podem ser programados para atividades complexas e perigosas, criando um verdadeiro conceito de equipe híbrida (VYSOCKY e NOVAK, 2016).

A utilização dos robôs dentro da indústria traz grandes vantagens no aumento da produção, qualidade dos produtos e retorno econômico. Assim, é importante que as empresas se preparem para realizar a sua transição para a Indústria 4.0, de forma a se manterem competitivas frente ao mercado (KHAN e TUROWSKI, 2016).

A robótica vem para facilitar a execução de tarefas mecânicas e perigosas, o que significa que haverá a necessidade de capacitar os funcionários com o desenvolvimento de habilidades mais refinadas, permitindo que seja capaz de realizar atividades mais complexas. É importante ressaltar que a proposta da Indústria 4.0 não é substituir a mão de obra humana, mas, sim, torná-la mais eficiente e eficaz (MÜLLER *et al.*, 2018).

A Indústria 4.0 também chamada de Quarta Revolução Industrial, engloba um amplo sistema de tecnologias avançadas como inteligência artificial, robótica, internet das coisas e computação em nuvem que estão mudando as formas de produção e os modelos de negócios no Brasil e no mundo (DOPICO *et al.*, 2016).

A Indústria 4.0 foi batizada também de 4ª Revolução Industrial, esse fenômeno está mudando, em grande escala, a automação e troca de dados, bem como as etapas de produção e os modelos de negócios, por meio do uso de máquinas e computadores. Inovação, eficiência e customização são as palavras-chave para definir o conceito de Indústria 4.0 (GHOBAKHLOO, 2018).

A Indústria 4.0 tem impacto significativo na produtividade da indústria, pois aumenta a eficiência do uso de recursos e no desenvolvimento de produtos em larga escala, além de propiciar a integração do Brasil em cadeias globais de valor (DALENOGARE *et al.*, 2018).

Além disso, implicará em transformações na gestão empresarial, principalmente em dois aspectos: O primeiro está relacionado à estratégia para implementar tecnologias, como a cooperação entre as áreas de tecnologia de informação (TI) e as de produção.

A Indústria 4.0 é um conceito que representa a automação industrial e a integração de diferentes tecnologias como: Inteligência artificial, Computação em nuvem, *Big data*, Cyber segurança, Internet das coisas, Robótica avançada, Manufatura digital, Manufatura aditiva, Integração de sistemas e Sistemas de simulação com o objetivo de promover a digitalização das atividades industriais melhorando os processos e aumentando a produtividade (ALCÁCER e CRUZ-MACHADO, 2019).

A incorporação da Robótica Avançada, dos Sistemas de Conexão Máquina-Máquina, da Internet das Coisas e dos Sensores e Atuadores utilizados nesses equipamentos possibilita que máquinas “conversem” ao longo das operações industriais. Isso pode permitir a geração de informações e a conexão das diversas etapas da cadeia de valor, do desenvolvimento de novos produtos, projetos, produção, até o pós-venda (HÁ *et al.*, 2019).

O desenvolvimento da Indústria 4.0 no Brasil envolve desafios que vão desde os investimentos em equipamentos com novas tecnologias, à adaptação de layouts, adaptação de processos e das formas de relacionamento entre empresas ao longo da cadeia produtiva, criação de novas especialidades e desenvolvimento de recursos humanos, entre outras (DALMARCO e BARROS, 2018).

Os veículos autoguiados tornaram-se parte da indústria 4.0. A Quarta Revolução está presente em todas as etapas de fabricação de um produto, com benefícios para segurança, rentabilidade, verificação de qualidade, montagem e bem-estar do trabalhador. E os AGVs são peças fundamentais nesse processo (IVANOV, 2017). Do termo em inglês, *Automatic Guided Vehicle*, os AGVs são robôs móveis com a capacidade de se movimentarem em lugares pré-determinados, de forma autônoma e sem correr o risco de se chocarem com outros elementos a sua volta. Facilmente programáveis, eles realizam o transporte de cargas pesadas, tarefas insalubres e são capazes de trabalhar 24 horas por dia, 7 dias por semana (MESSINA e JACOFF, 2006).

A indústria 4.0, é um termo designado para explicar a aplicação das novas tecnologias nos principais processos industriais. Cada vez mais, ferramentas, softwares e equipamentos avançados estão sendo incorporadas nas empresas, transformando os métodos de produção e a gestão na manufatura (ZHOU *et al.*, 2015). Uma grande participação que os veículos autoguiados na indústria 4.0. Eles representam um primeiro passo ideal para a automação, também servindo para complementar outros sistemas automáticos na logística e produção. Ao integrar os AGVs na indústria, uma empresa tem a oportunidade de ajustar seus processos de produção a uma estrutura totalmente nova. Dessa forma, esses processos podem ser adaptados às necessidades do cliente ou a uma nova situação de mercado. Dentre os principais benefícios que essa tecnologia oferece, podemos destacar: aumento na produtividade e redução de custos, diminuição no número de falhas, aumento na capacidade de personalização, maior competitividade, segurança para o funcionário e para a mercadoria (CATTANEO *et al.*, 2013).

A fábrica do futuro já é uma realidade, por isso, as tecnologias mais antigas começaram a ser substituídas por outras mais recentes, que incluem recursos mais sofisticados, parecidos com a tecnologia usada nos aplicativos de navegação que calculam sua própria rota, e são capazes de gerar mais agilidade e melhor aproveitamento dos recursos humanos em tarefas mais estratégicas. Tudo isso, além de reduzir custos, gera melhores resultados (CRAIG, 2013).

O AGV ou Veículo Autônomo Guiado (Automated Guided Vehicle), é uma tecnologia mais antiga que são guiados por faixas, guias ou fitas magnéticas, portanto, necessitam de um ambiente controlado para funcionarem (KAR *et al.*, 2016).

Os AVG eram, praticamente, a única opção para automatização do transporte de materiais dentro das indústrias. Porém, com os avanços tecnológicos e a necessidade

cada vez mais latente de adaptação a indústria 4.0, esses modelos foram evoluindo até chegaram a outros mais inteligentes (DIEZ-OLIVAN *et al.*, 2019).

Os robôs do tipo AMR ou Autonomous Mobile Robots, que são robôs totalmente autônomos, pois navegam a partir de sensores e scanners presentes em seus componentes. São facilmente programáveis e não precisam de uma estrutura ambiente especial para funcionarem (SIEGWART *et al.*, 2011).

Os AMRs, são dotados de inteligência baseada em software com mapas que são pré-carregados, imagens de câmeras e dados de sensores, que o tornam capazes de, até mesmo, escolherem a melhor rota para o transporte que deve ser realizado (PON, 2015).

Um dos diferenciais do AMR é que ele é um dispositivo de IoT. É possível se extrair dados dele para informação e consegue fazer o monitoramento, independentemente de onde ele está a todo momento. Já o AGV não possui esse tipo de tecnologia (PATRICIO e MENDES, 2020).

A IoT (Internet of Things) ou internet das coisas é a ligação virtual entre os objetos no mundo analógico com a internet, tornando-os mais inteligentes. Com essa tecnologia, os robôs AMR se tornam muito mais fáceis de programar e, conseqüentemente, mais flexíveis.

As inovações tecnológicas constante e a necessidade de adaptação a mudanças de forma ágil é uma das características da indústria 4.0. Nesse contexto, a capacidade de adequação do AMR às novas rotinas e configurações tornam os avanços e melhorias ainda mais dinâmicos, contribuindo para que a indústria inove cada vez mais.

Ou seja, se houver a necessidade de modificações na infraestrutura da fábrica ou nos processos de produção para aplicação de melhorias contínuas nos produtos, a flexibilidade dos AMR faz com que seja possível modificar suas “rotas” instantaneamente, acompanhando o movimento da fábrica.

Os robôs AMR têm mais alguns diferenciais além da facilidade de operação e a flexibilidade. A tecnologia aplicada neles possibilita, por exemplo, que, no caso do surgimento de um obstáculo ou colaborador na frente do equipamento, ele desvie do bloqueio e continue seu percurso sem ameaçar à própria segurança e das pessoas a sua volta.

Outro diferencial do AMR é quanto ao espaço para manobras que pode ser menor que os necessários quando o AGV está sendo utilizado. Isso se deve ao fato dele ser capaz de girar 360° sobre seu eixo, eliminando a necessidade de manobras (NASIR, 2019). Uma vez que seja programado as informações sobre como pegar e lagar a carga a

ser transportada, com base nas informações coletadas através de câmeras e sensores por meio de um software, é possível controlar uma frota de robôs AMR fazendo com que priorizem as tarefas mais adequadas de acordo com a localização e disponibilidade de cada um (FRAGAPANE *et al.*, 2021).

Os robôs AMR são mais flexíveis e seguros, que além de oferecem uma implementação mais simples, por não demandarem a preparação do ambiente, a solução se torna ainda menos dispendiosa, apesar de mais avançada. Com o baixo custo de implantação e otimização rápida de processos, a tecnologia AMR traz mais eficiência de forma, praticamente, imediata e com o um ROI (Retorno Sobre Investimento) em bem menos tempo, normalmente em menos de 6 meses.

Aliado à sua capacidade de adaptação e segurança, as aplicações dos equipamentos AMR se tornam quase ilimitadas, e são capazes de atender às necessidades de qualquer tipo de indústria. Sem contar com a possibilidade de melhor aproveitamento do capital humano da sua empresa e conseqüente aumento de produtividade.

Um dos principais problemas encontrados no desenvolvimento de robôs autônomos autoguiados é sua navegação, métodos relacionados a navegação têm sido propostos ao longo dos anos. A localização é uma informação essencial em ambiente fechado (*indoor*) para os sistemas de navegação dos robôs. Na navegação autônoma, o robô deve manter o conhecimento de sua posição e orientação ao longo do tempo (RIOS-MARTINEZ *et al.*, 2011). O conhecimento preciso da localização em relação ao ambiente é fundamental para que o robô possa calcular sua trajetória para executar uma determinada tarefa (CHATILA e LAUMOND, 1985). Uma localização imprecisa ou incerta pode ocasionar situações que o robô não desempenhe suas tarefas de forma eficaz, o que pode torná-lo ocioso (BROOKS, 1986).

O conjunto de informações necessárias para determinação da localização de plataformas robóticas é proveniente de observações sucessivas de sensores embarcados no próprio robô.

Uma das formas mais comuns para obtenção da localização do robô é a utilização da triangulação. Este mecanismo, entretanto, apresenta uma imprecisão crescente ao longo do tempo e uma sensibilidade elevada ao tipo de pavimento. Desta forma, é comum associar outros sensores para coletar dados da posição e orientação do robô, tais como as câmeras de vídeo, lasers, sistema de posicionamento global por satélite (GNSS), sensores ultrassônicos e os sensores inerciais. O uso combinado de

diversos sensores para a localização dificulta o tratamento das diferentes incertezas e imprecisões de cada sensor, a eliminação das perturbações provocadas ocasionalmente pelos sensores e a determinação do modelo de observação e movimentação mais apropriado (CHATILA e LAUMOND, 1985). O desafio de localização de pessoas ou objetos se divide praticamente no cenário de inserção, sendo eles: sistemas de localização em ambientes externos (*outdoor*), e sistemas de localização em ambientes internos (SANTOS, 2018). Localização em ambientes internos possui variáveis exclusivas e novos desafios quando comparada a externos, resultantes em grande parte em função do Sistema de Posicionamento Global - GPS (Global Positioning System) não funcionar de maneira satisfatória em ambientes internos (BERZ, 2015). Esse trabalho busca desenvolver um método para navegação de robôs do tipo AMR em ambientes fechados.

1.1 - CONTEXTO

Há diversas atividades que podem valer-se de aplicações que determinem a localização em ambientes fechados (*indoor*). É o caso de hospitais, onde é comum a ocorrência de casos urgentes ou emergenciais, que demandam saber onde os médicos se encontram. Outro exemplo é o caso de empresas, parques industriais, entrepostos de carga, etc., onde se deseja saber em que parte da empresa um dado funcionário está. Existe ainda casos de marketing direcionado e propagandas, onde pode-se gerar uma notificação, em *smart phone*, por exemplo, caso o usuário esteja passando próximo de uma loja ou produto, dentro de um centro comercial. Esta dissertação está concentrada nos métodos, técnicas e ferramentas para auxiliar o desenvolvimento de produtos e robôs que necessitam trabalhar com precisão de localização em ambientes internos, além de apresentar as principais tecnologias relacionadas ao tema, com suas respectivas vantagens, desvantagens, desafios, e por fim será proposto e desenvolvido o protótipo de um robô móvel, utilizando umas dessas técnicas.

1.2 - DEFINIÇÃO DO PROBLEMA

Atualmente o layout de produção da Transire possui 12 linhas de produção. Figura 1.1. Para que os produtos sejam produzidos, faz-se necessário alimentá-las com insumos distribuindo ao longo dos 36 postos de trabalho em cada linha. Para realizar

esta atividade, a empresa demanda de um operador para realizar a entrega de insumos e depositá-los em área já definida. Este operador é responsável por alimentar as linhas a cada duas horas.

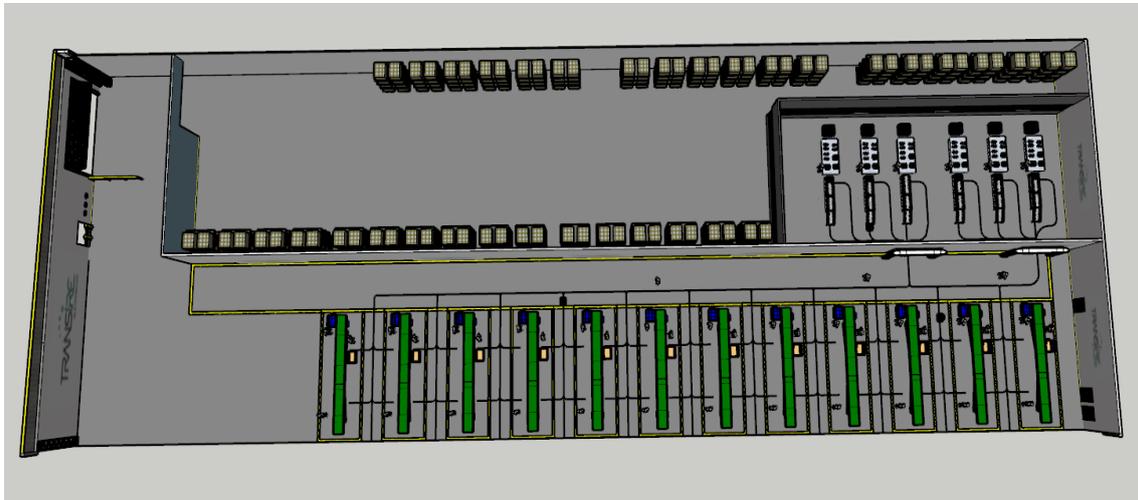


Figura 1.1 - Layout da fábrica transire.

O transporte de matérias/insumos dentro da fábrica é feito através de carrinhos tracionados por força humana. Dependendo da quantidade de matérias-primas e do produto a ser fabricado o peso para transportar o material do estoque a linha pode variar de produto a produto Figura 1.2.



Figura 1.2 - Transporte de materiais/insumos dentro da fábrica.

1.3 - MOTIVAÇÃO

O desenvolvimento de um robô autônomo inteligente do tipo AMR – Autonomous Mobile Robots, para a fábrica poupará tempo nos transportes internos, gerenciando também o abastecimento das linhas, bem como o tempo de entrega. Essa tecnologia móvel é inovadora quando aplicada à Logística 4.0. Afinal, conforme avançam as tecnologias industriais, os processos de logística devem acompanhar essas mudanças. Logística 4.0 significa se apropriar das tecnologias da Indústria 4.0 para tornar os processos logísticos mais eficientes, ágeis e lucrativos. Tem como objetivo otimizar a cadeia de distribuição, automatizar os processos de logística, eliminar desperdícios, ganhar tempo e reduzir custos (DA SILVA, 2019). A logística 4.0 tem como base o investimento em tecnologia para melhorar, principalmente, o controle de estoque, o abastecimento de linhas e a análise desses processos. (OLIVEIRA, 2019).

Os robôs autônomos são exemplos de recurso tecnológico a ser aplicado logística 4.0. Eles são programados por sistemas de computadores que indicam os movimentos necessários de acordo com o mapa da fábrica. O software desenvolvido para os robôs também coordena as tarefas a serem realizadas. Inserindo etiquetas em lotes de mercadorias que ativam sensores capazes de dar baixa automaticamente quando os itens entram no estoque ou saem do estoque, podem melhorar o manuseio dos itens de produção. As etiquetas têm a finalidade de avisar quando os produtos são levados para a linha de produção. Dessa forma, é possível saber em que etapa está cada remessa do transporte, quando foi embarcada e quando foi entregue ao destino.

Depois de selecionar os materiais no estoque, o operador colocará os itens no veículo, que os transportam para a linha de montagem. Esses robôs podem trabalhar lado a lado com seres humanos, não precisam de isolamento nem de trilhos ou fitas magnéticas dispostas no chão na fábrica, fitas essas que necessitam de manutenção constantes. Os robôs são totalmente autônomos e traçam a melhor rota para o ponto de destino, desviando de obstáculos e pessoas. Além disso, fazem o próprio gerenciamento de bateria e se movem para a estação de carregamento de forma automática sempre que necessário.

1.4 - OBJETIVOS

1.4.1 - Objetivo geral

O projeto tem como objetivo desenvolver um protótipo de Robô Móvel Inteligente do tipo AMR (Autonomous Mobile Robot) Figura 1.3, através do uso das ciências aplicadas como a Robótica e Engenharia de Controle, visando sanar problemas práticos e constantes nas indústrias. Esta é a geração de robôs inteligentes, que executam sua navegação sem a necessidade de fitas ou outros meios de condução fixa, viabilizando assim a reconfiguração de suas rotas durante seu percurso, de acordo com a variabilidade do ambiente operacional ao qual está inserido. Com isso, criam-se fronteiras de conhecimento, dispositivos, produtos e soluções para problemas tão cotidianos das indústrias de manufatura, além de criar solidas bases para o desenvolvimento tecnológico. O uso destas ferramentas de desenvolvimento é normalmente referenciado no cenário industrial como “pesquisa e desenvolvimento (P&D)” ou “research & development (R&D)”.

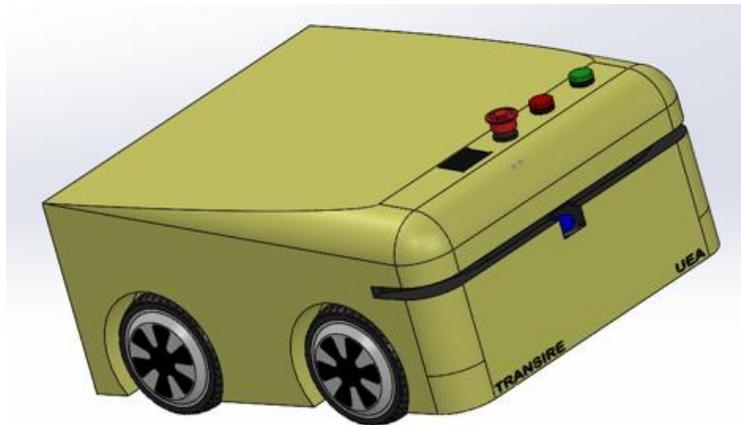


Figura 1.3 - Protótipo do robô autoguiado a ser desenvolvido.

1.2.2 - Objetivos específicos

- Mapear o estado da arte das tecnologias existentes para localização indoor;
- Desenvolver o projeto mecânico e eletrônico do robô;
- Aplicar um modelo matemático para simulação do robô.
- Projetar e/ou compor os itens de hardware para comunicação entre: robô, sistema de segurança, sistema de navegação;

- Inserir um método de Navegação Indoor;
- Avaliar a abordagem proposta.

1.5 - CONTRIBUIÇÕES DA DISSERTAÇÃO

A introdução deste trabalho apresentou o contexto, definição do problema, motivação e os objetivos desta pesquisa. Os capítulos restantes deste trabalho estão organizados da seguinte forma:

No Capítulo 2, Conceitos e Definições, as tecnologias atualmente empregadas para localização indoor.

Capítulo 3, Metodologia utilizada para o desenvolvimento do protótipo.

Capítulo 4, Desenvolvimento do protótipo, são descritas a arquitetura e a abordagem propostas neste trabalho para criação de um sistema de posicionamento interno, bem como as ferramentas utilizadas.

No Capítulo 5, Teste do protótipo, são apresentadas e definidas as características do experimento, bem como o seu modelo matemático para adquirir sua localização indoor bem como a forma utilizada para o processamento das informações de localização.

No Capítulo 6, e, por fim, Conclusões e Trabalhos Futuros, são expostas as considerações finais e os trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

2.1 - TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO

Os sistemas de localização podem ser organizados por categorias segundo diferentes técnicas, as quais são usadas para estimar a localização dos dispositivos móveis. Um sistema de localização é genericamente constituído por 3 entidades diferentes, sensores fixos, módulos móveis e um elemento gestor da rede de dispositivos ou sensores quando estes existem. Os módulos móveis são monitorizados por unidades fixas que habitualmente estão colocados em posições superiores (por vezes no teto). A sua localização é efetuada a partir da informação de monitorização, pela própria rede ou por um sistema microcontrolado ou microprocessado (ROSIQUE, 2019).

2.2 - IDENTIFICAÇÃO DIRETA

Esta técnica de localização está relacionada com a detecção de objetos através da sua proximidade com dispositivos de referência (dispositivo móvel frente a um determinado sensor). Exemplos desta técnica de localização são os sistemas baseados em infravermelhos, em que é identificado um emissor junto a um determinado sensor. Outro exemplo é o caso dos sistemas baseados em RFID (*radio-frequency identification*) presentes, por exemplo, em cartões que permitem identificar uma pessoa, através da sua passagem num sensor (ZAFARI, 2019).

2.3 - AQUISIÇÃO DE TEMPO

O conceito de localização de dispositivos por aquisição de tempo consiste na medição do tempo de propagação do sinal entre o emissor e vários receptores. Através dessa mesma medição, e conhecendo previamente a velocidade de propagação desse sinal, é possível estimar a distância do dispositivo localizável a vários pontos de referência. Existem várias técnicas baseadas neste conceito, tais como: *Time-of-Arrival* (ToA), *Times-Difference of Arrival* (TDoA) e *Time-of-Flight* (ToF) (AL-AMMAR, 2014).

Time of Arrival (ToA): Como o nome indica, esta técnica baseia-se na medição do tempo de chegada de um sinal entre o transmissor e o receptor. O tempo de transmissão é determinado a partir do valor do instante de transmissão e o ToA (tempo de chegada) marcado pelo receptor. Esta técnica exige a sincronização da rede, uma vez que um desvio de $1\mu\text{s}$ na medição do tempo poderá impor erros de centenas de metros (KHALAF-ALLAH, 2015).

Times-Difference of Arrival (TDoA): Esta técnica baseia-se na aquisição do tempo de transmissão, em vez do cálculo deste a partir de dois instantes. Para esse efeito, estes sistemas usam habitualmente duas tecnologias diferentes com velocidades de propagação distintas. A tecnologia de maior velocidade de propagação é usada para sinalizar o início da contagem temporal, enquanto a recepção do segundo sinal faz terminar essa mesma contagem, dando origem ao TDoA. A partir da velocidade de propagação do segundo sinal, consegue-se uma relação distância-tempo (WOŻNY, 2017).

Time-of-Flight (ToF): Esta técnica tem grande facilidade de implementação. É uma técnica de medição do tempo de comunicação entre dois pontos. Neste método, o emissor inicia a contagem de tempo no instante em que transmite um sinal, terminando esta contagem no instante em que recebe a resposta. Após efetuar a compensação do tempo de processamento (t_P) do receptor e dividir o tempo corrigido pelos dois sentidos da comunicação, o emissor determina o tempo de transmissão (t_T), que será usado no cálculo de distâncias e na determinação das posições relativas do emissor e do receptor (FOIX *et al.*, 2011).

2.4 - SISTEMA DE POSICIONAMENTO OUTDOOR

Os principais sistemas de posicionamento outdoor são: o GPS (Sistema Norte-Americano de Posicionamento Global) e o GLONASS (Sistema Russo de Navegação Global por Satélite). Ambos, fazem uso de satélites que fornecem informações horárias e dados atmosféricos (GREJNER-BRZEZINSKA e KEALY, 2004).

2.5 - O QUE FAZ UM GPS

O GPS (Global Positioning System - Sistema de Posicionamento Global) é um aparelho que teve sua origem no Departamento de Defesa dos Estados Unidos. Sua

função é a de identificar a localização de um aparelho chamado de receptor GPS. (EL-RABBANY, 2002).

Os aparelhos receptores, por sua vez, têm a função de enviar um sinal para os satélites. Assim, fazendo alguns cálculos, os quais você poderá visualizar mais abaixo, o receptor GPS consegue determinar qual a sua posição e, com a ajuda de alguns mapas de cidades, indicar quais caminhos você pode percorrer para chegar ao local desejado (GOLLEDGE *et al.*, 1998).

O princípio de funcionamento desses sistemas de posicionamento está em medir o tempo que o sinal emitido por cada satélite demora para encontrar a antena receptora (GREWAL *et al.*, 2007).

A velocidade de propagação do sinal no vácuo é de aproximadamente 300000km/s, se for conhecido o tempo necessário para o sinal atingir a antena receptora pode-se obter a distância entre o satélite e o receptor (TIPPENHAUER *et al.*, 2011).

Para que os GPS funcionem corretamente, faz-se necessário o uso de três componentes, chamados de: espacial, de controle e o utilizador. O espacial é composto de vinte e sete satélites que se encontram em órbita. Vinte e quatro deles estão ativos e três são os “reservas”, que entram em operação caso ocorra algum falha com um dos satélites principais (ZOGG, 2002).

A disposição destes satélites em órbita garante que sempre haja pelo menos quatro deles disponíveis em qualquer lugar do planeta. Assim, sempre que você e uma pessoa que mora no Japão estiverem usando o GPS, com certeza irão conseguir utilizar o aparelho sem problema (KURGAN, 2013).

O segundo componente, de controle, nada mais é do que estações de controle dos satélites. Ao todo são cinco estações espalhadas pelo globo terrestre. A função principal delas é atualizar a posição atual dos satélites e sincronizar o relógio atômico presente em cada um dos satélites (LANGLEY *et al.*, 2017).

O último componente, mas não menos importante, é o receptor GPS, e este é o único dos três que nós, usuários, devemos adquirir a fim de utilizar esta maravilha da tecnologia. Um receptor GPS nada mais é do que um aparelho que mostra sua posição, hora e outros recursos que variam de aparelho para aparelho (KENNEDY, 2002).

Um sistema de posicionamento outdoor com precisão de 1 metro deve possuir uma medida de tempo com uma precisão de 3 a 4 nano segundos (EXEL *et al.*, 2010).

Assim, é necessário que os satélites possuam relógios extremamente precisos. O tempo de propagação do sinal é muito pequeno, da ordem de 0,06 segundos se o satélite estiver em cima do receptor (BETZ, 2015).

A precisão do relógio do satélite é obtida a partir de relógios atômicos, que usam um padrão ressonante de frequência como contador. Esse relógio se baseia em uma propriedade do átomo, onde o padrão é a frequência de oscilação de sua energia. A cada 9.192.631.770 oscilações do átomo de césio-133 o relógio entende que se passou um segundo (WIKIPÉDIA, 2018).

Para que os relógios dos receptores não afetem a precisão da localização, esses são constantemente atualizados com a hora atômica transmitida pelos satélites. Conhecendo a distância entre o receptor e um satélite, apenas é possível afirmar que a localização é um ponto qualquer sobre uma esfera imaginária com raio igual a essa distância. Se conhecermos, entretanto, a distância do receptor em relação à um segundo satélite, sabe-se que a posição do receptor é qualquer ponto sobre a circunferência imaginária que resulta da intersecção das duas esferas, agora limitado a 4 em apenas duas dimensões. Com o valor de distância em relação à um terceiro satélite obtém-se a intersecção de mais uma esfera, que resulta em apenas 2 possibilidades de localização. Um desses pontos pode ser eliminado pois se encontrará no espaço, sobrando apenas 1 ponto que indicará a posição do receptor (HEDGECKOCK *et al.*, 2013).

2.6 - SISTEMA DE POSICIONAMENTO INDOOR

Devido à ineficácia dos sistemas de posicionamento outdoor no interior de edificações foram desenvolvidos sistemas de posicionamentos específicos para ambientes fechados. As principais tecnologias empregadas para ambientes indoors serão detalhadas a seguir, sendo divididas entre as que não utilizam rádio e as tecnologias sem fios (BELMONTE-FERNÁNDEZ *et al.*, 2017).

2.6.1 - Posicionamento magnético

O Sistema de posicionamento magnético é um método de localização *indoor* que não utiliza ondas de rádio, é praticamente baseado na variação de campo magnético da Terra que pode ser monitorado por um magnetômetro, presente na maioria dos dispositivos atuais. Normalmente, o campo magnético da Terra é usado apenas para

obter a direção, mas os pesquisadores desenvolveram um sistema que monitora as variações no campo magnético introduzidas por paredes de concreto e outros obstáculos construídos pelo homem, o que em conjunto com a boa sensibilidade dos magnetômetros usados nos aparelhos atuais permite determinar a posição dentro de ambientes cobertos com uma precisão de até 10 centímetros, funcionando muito bem como uma espécie de GPS para ambientes cobertos (MARIMOTO, 2012).

2.6.2 - Sistemas inerciais

Pode ser utilizada a medição de passos de um indivíduo através de um sensor que pode ser cruzado com mapas para a obtenção da posição do móvel. Os sistemas de navegação inerciais são normalmente dotados de, pelo menos, dois tipos de sensores: acelerômetros e giroscópios, O sensor MPU-6050 possui em um único circuito integrado um acelerômetro e um giroscópio, sendo aos todos 6 graus de liberdade, Figura 2.1. Os acelerômetros medem a força de aceleração. Os giroscópios dão a orientação de um determinado objeto (WU *et al.*, 2016).

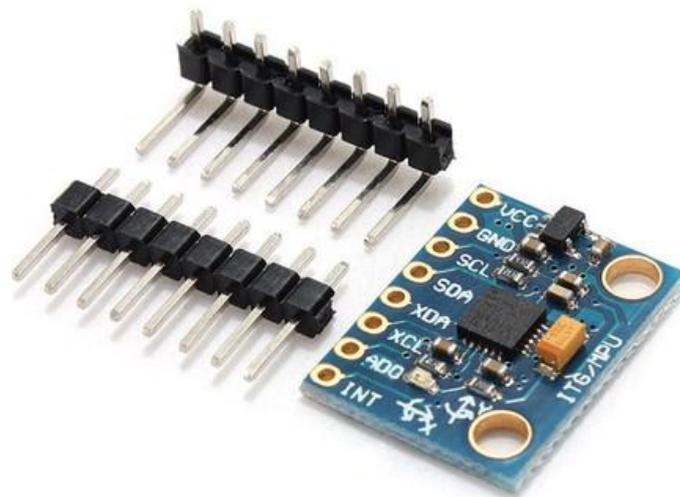


Figura 2.1 - Acelerômetro e giroscópio de 3 eixos MPU – 6050.

2.6.3 - Tecnologia Wireless

Dispositivos comumente usados para redes sem fio incluem computadores portáteis, computadores desktop, telefones celulares, entre outros. As redes sem fio funcionam de forma semelhante para redes com fio, no entanto, as redes sem fio devem

converter os sinais de informação em uma forma adequada para transmissão através do meio aéreo (HARDER, 2011).

As redes sem fio atendem a muitos propósitos. Em alguns casos, elas são usadas em substituição a rede de cabos ou quando a infraestrutura não permite a instalação deles, enquanto em outros casos elas são usadas para fornecer acesso a dados corporativos de locais remotos. A infraestrutura sem fio pode ser construída por um custo muito baixo em comparação com a rede com fio (DAVIS, 2004).

As redes sem fio proporcionam as pessoas acesso mais barato as informações. A Hora e esforço economizado por ter acesso à rede global de informações traduz em riqueza em escala local, pois mais trabalho pode ser feito em menos tempo e com menos esforço. Redes sem fio permitem que dispositivos remotos se conectem sem dificuldade, independentemente, esses dispositivos estão a poucos metros ou vários quilômetros de distância. Isso fez o uso desta tecnologia muito popular, se espalhando rapidamente (GAST, 2005). Existem muitas tecnologias que diferem entre si na frequência de transmissão usadas, velocidade e alcance de suas transmissões. Por outro lado, existem algumas questões relacionadas com a regulamentação de emissões dentro do espectro eletromagnético. As ondas eletromagnéticas são transmitidas através de diversos dispositivos, mas eventualmente, estes dispositivos estão sujeitos a interferências durante a transmissão / recepção. Por esse motivo, todos os países precisam de regulamentações que definam as faixas de frequência e potência de transmissão permitida para cada tecnologia. As redes de sensores sem fio (RSSF) estão em crescente desenvolvimento e seu uso vêm aumentando em diversos setores da sociedade devido à capacidade de monitorar e controlar ambientes sem necessidade de uma ligação física entre os seus dispositivos (LOUREIRO *et al.*, 2003). A comunicação sem fios (ou *wireless*) é utilizada em redes como WPANs (*Wireless Personal Area Network*), WLANs (*Wireless Local Area Network*), WMANs (*Wireless Metropolitan Area Network*) e WWANs (*Wireless Wide Area Network*), onde cada classificação varia de acordo com a área de aplicação e o alcance do sinal (SALAZAR, 2017), de acordo com a Figura 2.2.

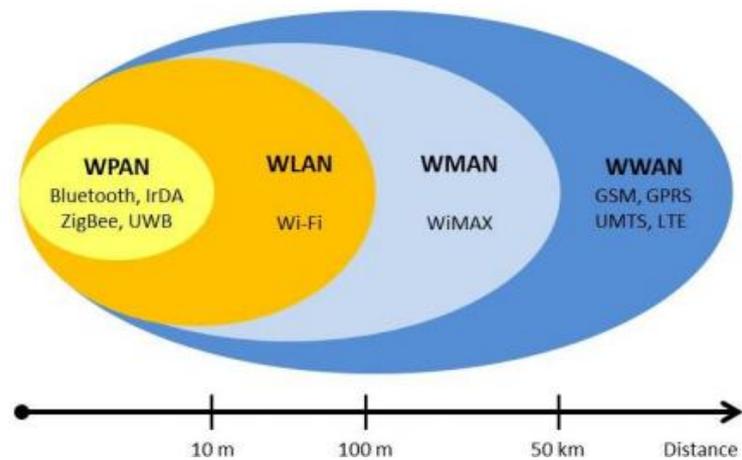


Figura 2.2- Classificação das redes sem fio.
 Fonte: SALAZAR, 2017.

A WWAN consiste em redes sem fio capazes de abranger uma grande área geográfica, a partir de antenas ou satélites. A *Wireless Metropolitan Area Network* (WMAN) permite conectar diferentes localizações numa área metropolitana (por exemplo, edifícios de escritórios numa cidade), utilizando fibra ótica ou cabos de cobre e linhas dedicadas. A *Wireless Local Area Network* (WLAN) abrange apenas uma área limitada, equivalente à um cômodo ou escritórios (PARK *et al.*, 2014).

2.6.4 - Wifi

A tecnologia Wifi permite a conexão entre diferentes pontos sem a necessidade de fios, através de aparelhos que utilizam radiofrequência ou luz como infravermelho. Dentre as principais tecnologias wireless temos (ENGST e FLEISHMAN, 2003):

IrDA – (Infrared Data Associations) - Barramento de transmissão através de luz infravermelha. Através de sinais de luz emitidos de um LED (diodo emissor de luz) infravermelho, é feita a transmissão de dados. Esses sinais são capturados por um sensor presente no aparelho, receptor (WILLIAMS e MILLAR, 1999). Apesar de ser uma interface barata, sua velocidade de transmissão de dados é baixa, alcançando até 115 kpbs. A mobilidade dela também é limitada, visto que tem um alcance não superior a apenas 2 metros e necessita de linha de visada, sem obstáculos, ou seja, os aparelhos precisam estar apontados um para o outro para que haja a transmissão de dados. Esse sistema é comumente utilizado nos controles remotos das TVs (JANUSZKIEWICZ *et al.*, 2016):

IrDA-D – Orientada a conexão entre dispositivos para transferência de dados;

IrDA-C – Orientada a comando e controle.

Wifi – (Wireless Fidelity) – Licenciada pelo Wi-Fi Alliance para descrever a tecnologia de redes sem fios embarcadas (WLAN) baseada no padrão IEEE 802.11. O WiFi, baseado no padrão IEEE 802.11, opera nas faixas ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) com os seguintes intervalos: 902 MHz - 928 MHz; 2,4 GHz - 2,485 GHz e 5,15 GHz - 5,825 GHz (dependendo do país, esses limites podem sofrer variações). O ponto de acesso transmite o sinal sem fios numa pequena distância, geralmente de até 100 metros, mas se a rede for do padrão IEEE 802.11n a distância pode chegar até 400 metros, Tabela 1 (MEGOWAN *et al.*, 1996).

Tabela 2.1 - Quadro comparativo IEEE 802.11.

IEEE 802.11	Frequência	Taxa de transmissão	Compatibilidade	Alcance <i>indoor / outdoor</i>
802.11b	2.4 GHz	11 Mbps	✓	30m / 160m
802.11a	5 GHz	54 Mbps	-	15m / 80m
802.11g	2.4 GHz	54 Mbps	✓	
802.11h	5 GHz	54 Mbps	-	15m / 80m
802.11n	2.4 GHz / 5 GHz	300 – 600 Mbps	✓	400m / -

2.6.5 - Bluetooth

O Bluetooth, também conhecido como IEEE 802.15.1, foi desenvolvida pela empresa Ericsson em 1994 (FERRO e POTORTI, 2005). Trabalha na frequência da ISM (*Industrial, Scientific and Medical*) de 2,4GHz e baixo alcance (dependendo da potência: 1 metro, 10 metros, 100 metros). Caracteriza-se por apresentar robustez, baixo consumo e custo acessível. Como utilizam sistema de comunicação via rádio, não é necessário linha de visão entre transmissor e receptor, apenas uma potência de recepção mínima para o funcionamento (DAVIES, 2002). A comunicação dos dispositivos Bluetooth é caracterizada pelo princípio de mestre/escravo, podendo ser feitas através de dois tipos de topologias: a *piconet* e a *scatternet*, conforme a Figura 2.3 (HAR-SHAI *et al.*, 2002).

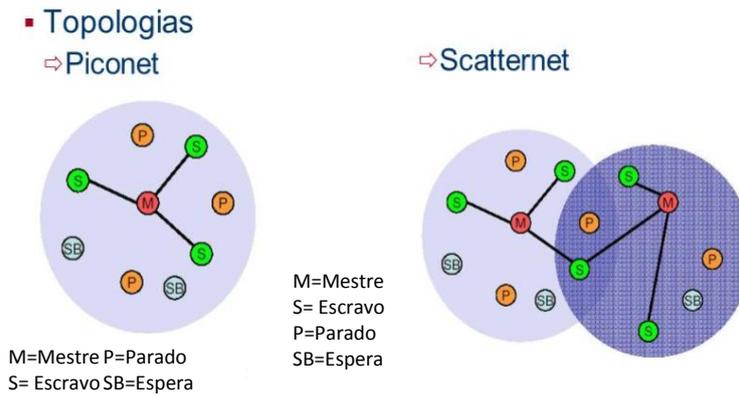


Figura 2.3 - Topologias bluetooth.

Os dispositivos podem se conectar formando redes limitadas a 8 nós, conhecidas como *piconets*, onde um é o nó mestre e o restante são os nós escravos ativos, que podem se situar dentro de um raio de cobertura de até 10m. Nesta topologia, todos os integrantes da comunicação estão sincronizados utilizando o relógio do mestre, sendo este responsável por alocar ou bloquear novas ligações. A comunicação do mestre para os escravos pode ser ponto a ponto ou ponto multiponto (MIORANDI e ZANELLA, 2002).

Para reduzir o consumo de energia, os dispositivos escravos podem operar no modo standby. Outra topologia, chamadas scatternet, sendo está a sobreposição de várias piconets a fim de se formar estruturas maiores (MCDERMOTT-WELLS, 2004). Um escravo pode pertencer a diversas piconets. Ao sair de uma piconet, o escravo deve informar ao mestre que não estará disponível por um determinado período de tempo, entretanto o restante na piconet continuam sua comunicação normalmente. Se o mestre deixar a piconet, esta fica indisponível, até seu retorno a mesma (BISDIKIAN, 2001), conforme a Figura 2.4.

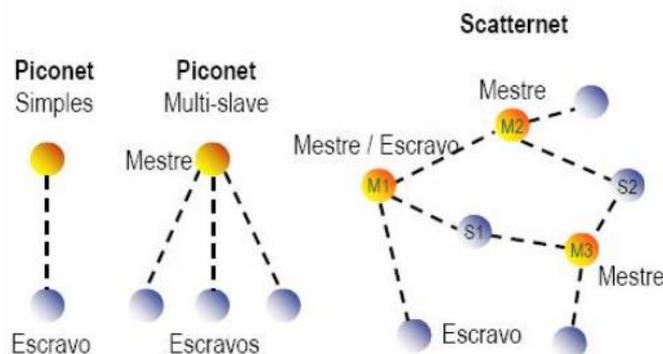


Figura 2.4 - Configuração bluetooth dependendo da conexão.

2.6.6 - ZigBee

A rede ZigBee é um conjunto de especificações para redes sem fio pessoais (WPAN), ou seja, conexões de rádio digital entre computadores. A WPAN possui baixa taxa de transferência de dados. O ZigBee é uma rede WPAN de baixa taxa de transferência de dados, baixo ruído e baixo consumo, portanto, caracterizado pela longa duração da bateria. A ZigBee Alliance, órgão que define os padrões ZigBee, também publica perfis de aplicativos que permitem vários fornecedores criar produtos interoperáveis que trabalhem nessa frequência, (AHAMED, 2009).

As bases da tecnologia que atualmente é conhecida por ZigBee foram criadas e estabelecidas pela Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE). O nome é oriundo da analogia entre o funcionamento de uma rede em malha (*Mesh Network*) e a forma com que as abelhas trabalham e se deslocam, a Figura 2.5 mostra um módulo tipo Zigbee que é frequente utilizado em projetos IoT.



Figura 2.5 - Módulo Xbee Zigbee.

As abelhas vivem numa colmeia voam em *zig zag*. Quando estas voam em busca do néctar elas se comunicam com as outras abelhas da mesma colmeia, transmitindo informações sobre a distância, direção e localização de alimentos. Juntando o *zig zag* com a tradução de abelha para inglês, surgiu o ZigBee. O ZigBee é um protocolo de rede sem fio destinados a aparelhos IoT, com foco em dispositivos de baixa potência, (SOUSA, 2019).

A filosofia do ZigBee difere-se das redes sem fio já existentes, como o WiFi ou o Bluetooth, pois não utiliza elevada largura de banda para a transmissão de grande

quantidade de dados, mas sim uma comunicação confiável aliada à um consumo extremamente baixo de energia (DEMENTYEV *et al.*, 2013). Possui baixas taxas de transmissão para aplicações e monitoramento e controle, que possibilitam a utilização de baterias como fonte de alimentação dos dispositivos. O protocolo transmite dados por meio de ondas de rádio em uma frequência de 2,4GHz com imunidade e sem interferências transmitindo dados a taxas de transferência entre 20kbit/s e 250kbit/s (CHHABRA, 2013). As topologias são mostradas na Figura 2.6.

- **Estrela:** Na topologia em estrela existe um dispositivo central que controla toda a rede, gerenciando a comunicação entre as estações.
- **Malha:** Já na topologia em malha todos os dispositivos podem ajudar a gerir a rede, ou seja, há mais de uma conexão entre os dispositivos.
- **Árvore:** Enquanto na topologia de árvore é um equivalente a várias redes estrelas interligadas entre si através de seus nós centrais

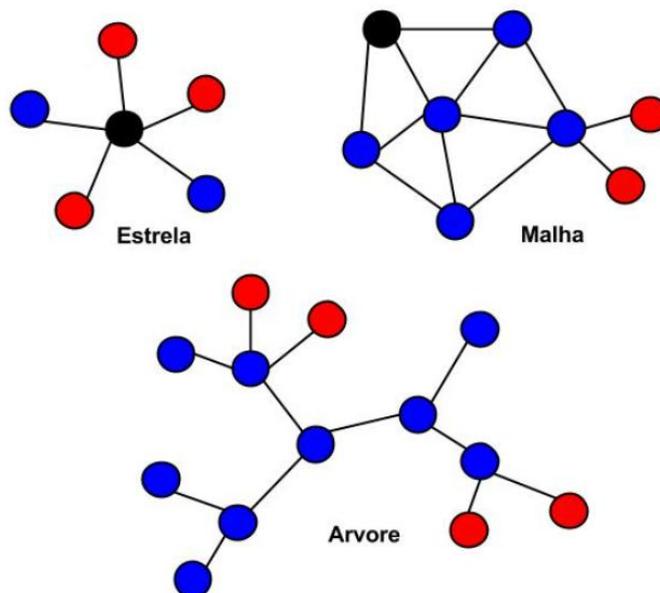


Figura 2.6 - Construção das topologias de rede ZigBee.

2.6.7 - RSSI

Este método recorre à análise da intensidade do sinal recebido, *Received Signal Strength Indication* (RSSI), no receptor e a um modelo que descreve como esta varia com a distância. O sinal transmitido sofre atenuação durante o seu percurso, diminuindo a sua potência de forma proporcional à distância percorrida (PRIWGHARM e CHEMTANOMWONG, 2011). A técnica permite determinar a localização de um

módulo móvel como estando na proximidade de um sensor, através dos valores de RSSI, ou através das distâncias estimadas por três sensores, a partir dos valores de RSSI adquiridos. O cruzamento de três circunferências, cada uma com centro num diferente sensor, delimita uma pequena área onde é maior a probabilidade de se encontrar o módulo móvel. Este método é designado por triangulação (WANG *et al.*, 2013). A localização de dispositivos baseada em RSSI pode ser mais precisa quando realizada segundo o método de *fingerprinting*. Este método compreende duas fases. A fase *offline* e a fase *online*. Na fase *offline* o RSSI é medido numa grelha de pontos numa área de interesse, enquanto a fase *online* usa essa mesma grelha para criar os parâmetros do modelo de propagação. Quanto mais alto for o número de pontos usados para criar o modelo, melhor será a calibração, mas também mais elevados serão os gastos. Esta técnica tem também a desvantagem de ser um processo moroso e sempre que se altera a área de interesse tem de se alterar o modelo criado, (MATOS, 2010).

2.7 - TÉCNICAS DE LOCALIZAÇÃO

O GPS não é bem-sucedido para localização em ambientes Indoor, devido a construção do local, o sinal pode ser fraco ou até mesmo inexistente, afetando assim a acuracidade da posição. Nos dias de hoje, algumas técnicas são utilizadas para a navegação em ambientes *Indoor* (BARROSO, 2015). Todos os sistemas de posicionamento descritos na seção anterior podem utilizar diferentes técnicas de localização para estimar a posição do dispositivo móvel em ambientes Indoor. Nesta seção serão abordadas as principais técnicas existentes: proximidade, trilateração, triangulação e *fingerprinting*.

2.7.1 - Proximidade

Na técnica de proximidade o objeto a localizar é descoberto pelo ponto de referência que estiver mais próximo, ou seja, ao sabermos a localização dos pontos de referência sabemos a localização do objeto. Este método pode ser obtido através de 3 processos: contacto físico, monitorização dos pontos de acesso sem fio e observação de sistemas de identificação automática. Contacto físico consiste em detectar o toque físico entre o objeto a localizar e o ponto de referência. O ponto de referência pode ser

baseado em sensores de pressão ou de toque. Ao se conhecer a posição do ponto de referência é possível saber a posição do objeto a localizar.

O método monitorização dos pontos de acesso sem fio consiste num dispositivo móvel detectar um ou mais pontos de acesso. Caso o dispositivo detecte mais do que um ponto de acesso, ele usa o valor máximo de RSSI (Received Signal Strength Indicator) para escolher o ponto de acesso à qual se vai ligar. Observação de sistemas de identificação automática é o método onde a partir das ações da pessoa se pode estimar a sua posição. Por exemplo, ao fazer um pagamento com um cartão de crédito, registos de telefones fixos, passar nas portagens, etc. Ou seja, uma pessoa que use o cartão num terminal multibanco é possível saber quando e onde este foi utilizado, podendo-se estimar a localização do utilizador (HIGHTOWER e BORRIELLO, 2001)

A técnica mais simples de posicionamento indoor é através de um detector de proximidade colocado em uma posição específica do ambiente. Dessa forma, quando o usuário estiver dentro da área de alcance do detector, se for conhecida a localização dos pontos de referências Figura 2.7, sabe-se a posição do móvel. Este método pode ser feito através de 3 processos: contacto físico, monitorização dos pontos de acesso sem fio e observação de sistema de identificação automática (BARROSO, 2015).

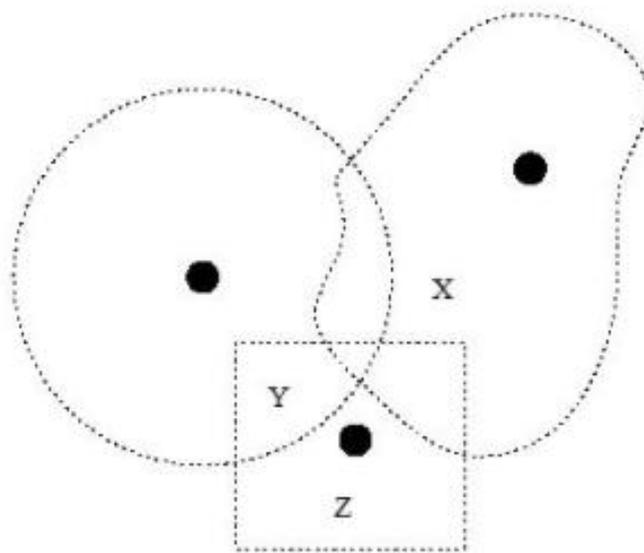


Figura 2.7 - Localização por proximidade, monitorização por pontos.
Fonte: COIMBRA, 2004.

No processo de contato físico, a posição do móvel é feita com a detecção de toque físico entre o móvel e o ponto de referência, composta por sensores de pressão ou

de toque. Já o método de monitorização de pontos de acesso sem fio se baseia detecção de pontos de acesso pelo dispositivo móvel. Se houver a detecção de mais de um ponto de acesso, obtém-se o ponto mais próximo do móvel através da medição da máxima intensidade de sinal (RSSI) (LUO *et al.*, 2011). No método de identificação automática a posição é estimada a partir das ações das pessoas.

2.7.2 - Triangulação

A técnica de triangulação usa as propriedades geométricas de triângulos para estimar a localização do alvo, (MITTELSTADT, 2018). Tem duas derivações, uma delas a *lateration*, que calcula a posição de um dispositivo através da medição das distâncias a vários pontos de referência. Esses pontos de referência são transmissores de sinal e a sua localização deve ser conhecida. A posição do utilizador pode ser calculada baseada na medição da distância entre o ponto de referência e a sua localização, Figura 2.8.

Após essa medição é criado um círculo onde o raio tem precisamente essa mesma medição, o centro do círculo é o ponto de referência. Este procedimento deve ser feito também para os outros dois pontos de referência, depois de se ter os três círculos é possível saber a interseção entre eles, essa interseção é a posição do utilizador, (MITTELSTADT, 2018).

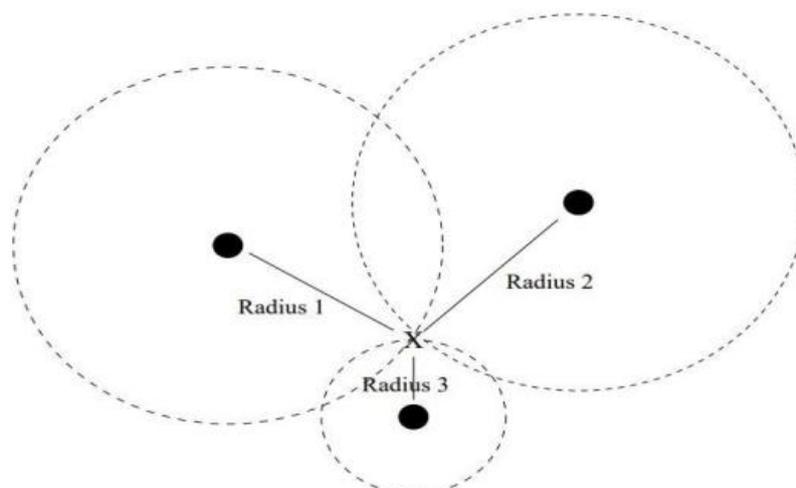


Figura 2.8 - Técnica de triangulação.
Fonte: MITTELSTADT, 2018.

2.7.3 - Trilateração

É o método mais básico e intuitivo, é usado quando são conhecidas as posições de três referências e as distâncias delas até o ponto que se deseja estimar, como mostra Figura 2.9, Pode-se afirmar que a trilateração se dá pela intersecção de três círculos centrados na posição das referências, tendo o raio igual a cada medição de alcance, (VOLPATO, 2018).

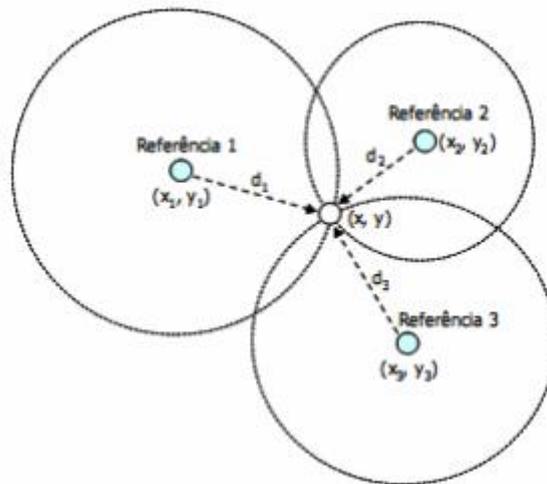


Figura 2.9 - Trilateração.

2.7.4 - Fingerprinting

A técnica de posicionamento *fingerprinting* consiste na análise de uma característica única de um cenário, onde essa característica é recolhida e em seguida, comparada com os dados existentes na base de dados para cada cenário. Dessa forma, essa técnica é composta por duas fases: uma fase de calibração (*off-line*) e uma fase de comparação (*online*) (DING *et al.*, 2013). Na fase *off-line* são recolhidas informações sobre a intensidade de sinal recebida pelo receptor móvel em relação à cada uma das bases transmissoras em diversos pontos do ambiente desejado. Os dados coletados nessa fase são armazenados em uma base de dados. Cada local deve conter uma lista dos valores de intensidade do sinal para todos os pontos de acesso visíveis. Isto deve ser feito, pois a posição do utilizador/dispositivo móvel pode influenciar os valores medidos pelo ponto de acesso. Já na fase *online*, um receptor móvel irá coletar informações de intensidades de sinal que deverão ser comparadas com os valores

obtidos no mapa de propagação, criado na fase anterior, para estimar sua posição (DING *et al.*, 2013).

2.7.5 - Bluetooth Low Energy

O Bluetooth Low Energy (BLE) é um tipo de bluetooth de baixo consumo cerca de 10% em relação ao bluetooth padrão. Isso porque este último foi criado apenas visando a transmissão de dados. O BLE também foi desenvolvido para transmissão de dados, porém com um forte viés de maximizar a economia da bateria, justamente para garantir um longo de tempo de transmissão de informações. O protocolo de transmissão BLE ganhou força em 2010, com o surgimento de sua versão 4.0 do bluetooth. Ele teve seu uso massificado a partir de então porque permitia facilmente conexões sem fio de curto e médio alcance. Suas características fazem com que um dispositivo BLE atue na maior parte do tempo em modo *sleep (modo de baixo consumo)*, sendo ativado apenas para realizar conexões dures milésimos de segundos. Sendo assim, ele é ideal para aplicações que informações esporadicamente, (MATTI SIEKKINEN, 2012).

2.7.6 - Beacons

O Beacon é um dispositivo que é capaz de dar com precisão a localização em um ambiente fechado. Os Beacons são aparelhos que emitem um sinal de rádio através da tecnologia bluetooth low energy (BLE), conhecida também como bluetooth 4.0. Esses sinais podem ser captados por aplicativos de smartphones e tablets, e podem ser interpretados como gatilhos para uma determinada ação em um aplicativo. Para facilitar o entendimento é como se os Beacons fossem GPS para ambientes fechados, contudo, eles não conseguem detectar a localização geográfica (PAVEL KRIZ, 2016). Eles conseguem dizer se o dispositivo está perto ou longe do local instalado. Os Beacons usam o Bluetooth Low Energy para detectarem a proximidade de outros dispositivos e transmitirem um número identificador único que é então recebido pelo sistema operacional do dispositivo com o qual ele está se comunicando, basta o usuário estar com o Wi-Fi conectado no local (LINDH, 2015). O GPS é um aparelho que realiza a localização de usuários em ambientes abertos e é muito útil no trânsito. Os Beacons têm outro objetivo. O sinal emitido por eles somente tem a capacidade de localizar objetivos em ambientes fechados. Embora a forma de mapeamento seja semelhante, tanto os

sinais emitidos quanto o que se pode obter por meio das duas tecnologias é bem diferente.

2.8 - CONTROLE DE PID (PROPORCIONAL, INTEGRAL E DERIVATIVO)

O controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é o algoritmo de controle mais usado na indústria e tem sido utilizado em todo o mundo para sistemas de controle industrial. A popularidade de controladores PID pode ser atribuída em parte ao seu desempenho robusto em uma ampla gama de condições de funcionamento e em parte à sua simplicidade funcional, que permite aos engenheiros operá-los de uma forma simples e direta.

Como o nome sugere, o algoritmo PID é composto por três coeficientes: proporcional, integral e derivativo, que são variados para obter a resposta ideal (GILLARD, 2018).

2.8.1 - Definição das terminologias de controle

O processo de projeto de controle começa pelos requisitos de desempenho. O controle de desempenho do sistema geralmente é medido pela aplicação de uma função degrau definida como comando *setpoint*, em seguida é medida a resposta da variável de processo. Geralmente, a resposta é quantificada pelas características da onda de resposta. O tempo de subida é o tempo que o sistema leva para ir de 10% a 90% do estado estacionário, ou valor final. O Percent Overshoot é o valor que a variável de processo ultrapassa o valor final, expresso como uma porcentagem do valor final (SHAMSUZZOHA e SKOGESTAD, 2010). *Settling time* é o tempo necessário para a variável do processo chegar dentro de uma determinada porcentagem (normalmente 5%) do valor final (JANTZEN e JAKOBSEN, 2016). *Steady-State* de erro é a diferença final entre as variáveis do processo e o *setpoint*. Note que a definição exata dessas quantidades varia na indústria, Figura 2.10.

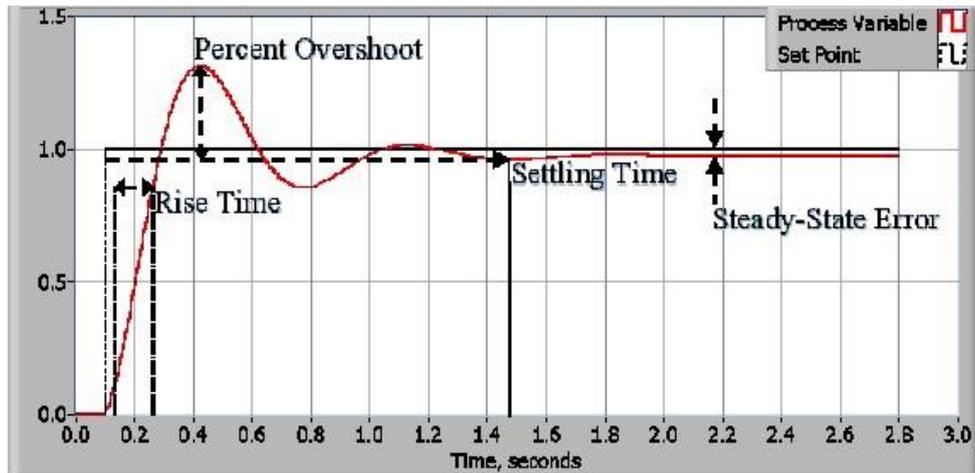


Figura 2.10 - Resposta de uma fonte de PID de malha fechada.

Depois de usar um ou todos os parâmetros para definir os requisitos de desempenho de um sistema de controle, é importante definir as condições de pior caso e o sistema de controle deverá atender esses requisitos de projeto. Muitas vezes, há um distúrbio no sistema que afeta a variável de processo ou a medição da variável de processo. É importante criar um sistema de controle que responda satisfatoriamente em condições de pior caso. A medida de quão bem o sistema de controle é capaz de superar os efeitos dos distúrbios é conhecida como a rejeição de distúrbios do sistema de controle (TORRES, 2020).

Em alguns casos, a resposta do sistema a uma saída de controle pode mudar ao longo do tempo ou em relação a algumas variáveis. Um sistema não linear é um sistema no qual os parâmetros de controle produzem uma resposta desejada a um ponto de operação e não produzem uma resposta satisfatória em relação a outro ponto de operação. Por exemplo, uma câmara parcialmente preenchida com um líquido vai apresentar uma resposta muito mais rápida na saída de um aquecedor do que quando estiver mais cheia deste mesmo líquido. A robustez do sistema de controle é entendida como a medida com que o sistema irá tolerar os distúrbios e as não-linearidades. Alguns sistemas apresentam um comportamento indesejável chamado *deadtime*. *Deadtime* é um atraso entre o momento que ocorre uma mudança da variável de processo e quando essa mudança pode ser observada (FONG-CHWEE e SIRISENA, 1988). Por exemplo, se um sensor de temperatura é colocado longe de uma válvula de entrada de água fria não irá medir a mudança da temperatura imediatamente se a válvula for aberta ou fechada. *Deadtime* também pode ser causado por um atuador do sistema ou por uma saída lenta, demorando para responder ao comando de controle. Por exemplo, uma válvula lenta

para abrir ou fechar. Uma fonte comum de *deadtime* em fábricas de produtos químicos é o atraso causado pelo fluxo do fluido através de tubulações. O *Loop cycle* também é um parâmetro importante de um sistema de loop fechado. O *Loop cycle* é o intervalo de tempo entre as chamadas para um algoritmo de controle. Sistemas que mudam rapidamente ou tem comportamentos complexos, exigem taxas de loop de controle mais rápidas (TORRES, 2020).

2.8.2 - Resposta proporcional

A componente proporcional depende apenas da diferença entre o ponto de ajuste e a variável de processo. Esta diferença é referida como o termo de erro. O ganho proporcional (K_c) determina a taxa de resposta de saída para o sinal de erro. Por exemplo, se o termo de erro tem uma magnitude de 10, um ganho proporcional de 5 produziria uma resposta proporcional de 50. Em geral, aumentando o ganho proporcional irá aumentar a velocidade da resposta do sistema de controle. No entanto, se o ganho proporcional é muito grande, a variável de processo começará a oscilar. Se K_c é aumentado ainda mais, as oscilações ficarão maior e o sistema ficará instável e poderá oscilar até mesmo fora de controle (AHMAD *et al.*, 2017).

2.8.3 - Resposta integral

A componente integral soma o termo de erro ao longo do tempo. O resultado é que mesmo um pequeno erro fará com que a componente integral aumente lentamente. A resposta integral irá aumentando ao longo do tempo a menos que o erro seja zero, portanto, o efeito é o de conduzir o erro de estado estacionário para zero. O *Steady-State* de erro é a diferença final entre as variáveis do processo e do set point. Um fenômeno chamado *windup* integral ocorre quando a ação integral satura um controlador, sem que o controlador ajuste o sinal de erro para zero (MAZARI *et al.*, 2018).

2.8.4 - Derivada de resposta

A componente derivada faz com que a saída diminua se a variável de processo está aumentando rapidamente. A derivada de resposta é proporcional à taxa de variação da variável de processo. Aumentar o parâmetro do tempo derivativo (T_d) fará com que

o sistema de controle reaja mais fortemente à mudanças no parâmetro de erro aumentando a velocidade da resposta global de controle do sistema. Na prática, a maioria dos sistemas de controle utilizam o tempo derivativo (T_d) muito pequeno, pois a derivada de resposta é muito sensível ao ruído no sinal da variável de processo. Se o sinal de feedback do sensor é ruidoso ou se a taxa de malha de controle é muito lenta, a derivada de resposta pode tornar o sistema de controle instável (ANWAR *et al.*, 2017).

2.8.5 - Ajuste

O processo de configuração ideal para os ganhos P, I e D para obter uma resposta ideal de um sistema de controle é chamado ajuste. Existem diferentes métodos de ajuste, o método “**guess and check**” e o método de **Ziegler Nichols**, que é o mais comum método de correção de erro em PID (REIS, 2020).

Os ganhos de um controlador PID podem ser obtidos pelo método de tentativa e erro. Uma vez que um engenheiro entende o significado de cada parâmetro de ganho, este método torna-se relativamente fácil. Neste método, os termos I e D são definidos para zero e o ganho proporcional é aumentado até a saída do loop começar a oscilar. Quando se aumenta o ganho proporcional, o sistema torna-se mais rápido, mas deve-se tomar cuidado para não torná-lo instável. Uma vez que P foi definido para obter uma resposta rápida desejada, o termo integral é aumentado a fim de parar as oscilações. O termo integral reduz o erro de estado estacionário, mas aumenta o overshoot. Um certo valor de overshoot é sempre necessário para um sistema rápido de modo que possa responder às mudanças imediatamente. O termo integral é novamente ajustado para atingir um mínimo erro de steady state. Uma vez que o P e I foram definidos para que o sistema de controle seja rápido com o steady state mínimo e constante, o termo derivativo é aumentado até que o loop seja aceitavelmente rápido em relação ao seu ponto de referência. Aumentar o termo da derivada diminui o overshoot, aumentando o ganho, mantendo a estabilidade e ainda fazendo com que o sistema seja altamente sensível ao ruído. Muitas vezes, o engenheiro tem a necessidade de fazer a compensação de uma característica de um sistema de controle para melhorar outro, e assim atender às suas necessidades (GOODWIN, 2020).

O método de Ziegler-Nichols é um outro método popular de ajustar um controlador PID. É muito semelhante ao método de tentativa e erro, onde o I e o D são definidas como zero e P é aumentado até que o ciclo começa a oscilar. Uma vez iniciada

a oscilação, o ganho crítico K_c e o período de oscilações P_c são anotados. O P, I e D são então ajustados de acordo com a tabela mostrada abaixo (ASTRÖM e HÄGGLUND, 2004).

Tabela 2.2- Ajuste de um controlador usando o método Ziegler-Nichols.

Controle	P	Ti	Td
P	$0.5K_c$	-	-
PI	$0.45K_c$	$P_u/1.2$	-
PID	$0.60K_c$	$0.5P_c$	$P_c/8$

Fonte: ASTRÖM e HÄGGLUND, 2004.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Segundo SEVERINO (2016) várias são as modalidades de pesquisa que se podem praticar, o que implica coerência epistemológica, metodológica e técnica, para o seu adequado desenvolvimento. De acordo com PRODANOV (2013), método científico é o conjunto de processos ou operações mentais que devemos empregar na investigação. É a linha de raciocínio adotada no processo de pesquisa. PRODANOV (2013) afirma ainda que a utilização de um ou outro método depende de muitos fatores: da natureza do objeto que pretendemos pesquisar, dos recursos materiais disponíveis, do nível de abrangência do estudo e, sobretudo, da inspiração filosófica do pesquisador.

Assim, se faz necessária a escolha de um método que se apresente mais adequado ao contexto abordado e possibilite, de forma eficaz, a obtenção dos resultados esperados. Segundo PRODANOV (2013) o método hipotético-dedutivo inicia-se com um problema ou uma lacuna no conhecimento científico, passando pela formulação de hipóteses e por um processo de inferência dedutiva, o qual testa a predição da ocorrência de fenômenos abrangidos pela referida hipótese. A partir desta ótica, temos que a pesquisa em questão objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática, dirigidos à solução de problemas específicos, envolvendo verdades e interesses locais. O que PRODANOV (2013) aponta como pesquisa aplicada.

Quanto aos objetivos desta pesquisa, SEVERINO (2014) caracteriza-a como exploratória, por buscar apenas levantar informações sobre um determinado objeto, delimitando assim um campo de trabalho, mapeando as condições de manifestação desse objeto.

Adotou-se o modelo de pesquisa experimental, como apontado por SEVERINO (2014), é a pesquisa que toma o próprio objeto em sua concretude como fonte e o coloca em condições técnicas de observação e manipulação experimental nas bancadas e pranchetas de um laboratório, onde são criadas condições adequadas para seu tratamento.

Quanto a técnica de pesquisa, foi utilizada a modalidade de observação que é todo procedimento que permite acesso aos fenômenos estudados. É etapa imprescindível em qualquer tipo ou modalidade de pesquisa, conforme assinala SEVERINO (2014).

CAPÍTULO 4

MATERIAIS E MÉTODOS

Definidas as diretrizes de pesquisa, a abordagem e fronteiras epistemológicas, temos a seguir a necessidade da obtenção das características gerais do que, de acordo com a metodologia adotada, será definido como o problema a ser abordado.

Para ilustrar um contexto geral do estudo proposto no projeto, temos a seguir um diagrama de fluxo, que aponta as principais etapas do processo em questão, Figura 4.1.

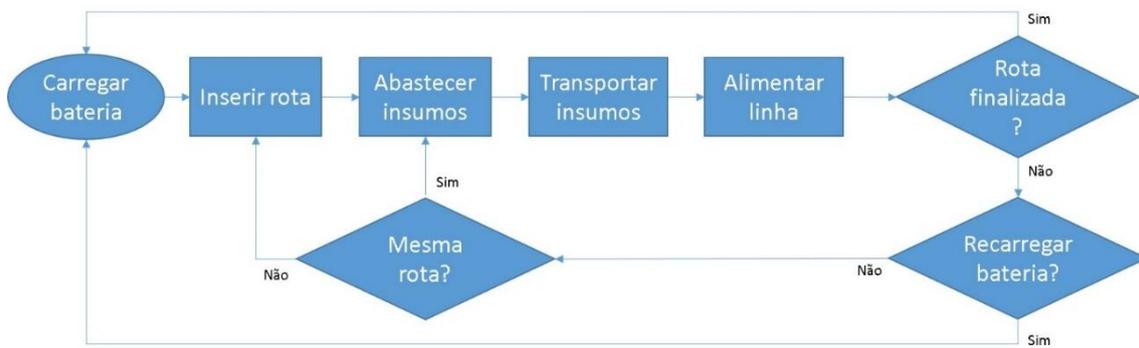


Figura 4.1 - Diagrama de fluxo, ilustração do problema.

Assim sendo, deduz-se então que para atingir a finalidade de resolução do problema, alguns procedimentos devem ser efetuados. O estudo bibliográfico de fontes de referência em engenharia de controle e automação, sistemas embarcados e métodos de localização *indoor* e áreas correlatas é imprescindível para que se possa obter de forma satisfatória os componentes e bases teóricas para o desenvolvimento e aprimoramento do projeto. Será desenvolvido no decorrer do projeto um sistema de gerenciamento de trajetória bem como de baterias. O sistema de gerenciamento de trajetórias será responsável informar ao robô a rota que o mesmo deverá percorrer, uma vez de posse da rota o robô irá buscar os insumos a transportar, levando o mesmo para a linha de produção. Uma vez realizada essa tarefa de transporte o robô verificar a próxima tarefa, obtendo a mesma trajetória ou uma nova trajetória. Caso não tenha uma nova tarefa irá para sua base para recarregar a bateria enquanto aguarda a próxima tarefa, Figura 4.1. Para que o robô possa executar essas tarefas, realizando-as da melhor forma possível, faz-se necessário desenvolvermos toda a estrutura mecânica eletrônica do robô da forma listada abaixo.

A Tabela 4.1 mostra os itens a serem utilizado no projeto proposto.

Tabela 4.1 - Listas de materiais utilizados para construção do protótipo.

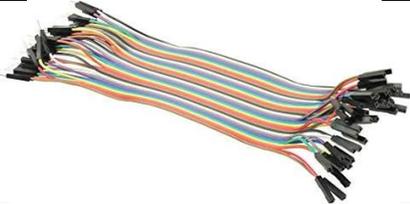
Itens	Nome	Descrição	Imagem
1	Lynxmotion Aluminum A4WD1 Chassis	Sistema de acionamento diferencial 4WD	
2	Sabertooth Dual 12A 6V-24V R/C Regenerative Motor Driver	Driver para controle e acionamento dos motores	
3	Arduino Mega Pro	Placa microcontrolada. Possui 54 pinos de entrada/Saída, dos quais 15 podem ser usadas como PWM.	
4	LIDAR-Lite 3 Laser Rangefinder	Sistema laser para prevenção de colisão.	
5	Marvelmind Starter Set HW v4.9-NIA (915MHz)	Beacon para navegação indoor	
6	Fios e Cabos	Utilizado para fixação dos componentes	
7	Display LCD 20x4	Utilizado para saída de informações para acompanharmos o recebimento dos dados do Beacons	

Tabela 4.2 - Ferramentas de software utilizadas.

Ferramenta	Conceito	Aplicação no projeto
SolidWorks	Software destinado a criação de protótipos mecânicos virtuais tridimensionais. Nele é possível também simular funcionamento de peças, conjuntos.	No projeto, o software foi utilizado para modelar todas as peças e dispositivos mecânicos. A partir de protótipos tridimensionais, será gerado desenhos 2D e encaminhado para processo de usinagem.
Proteus VSM 8.1	Software que permite a criação de circuitos, simular e elaborar layouts de aplicações analógicas e digitais, inclusive microcontroladores.	Será aplicado para o desenvolvimento de placas e ligações eletrônicas.
VsCode	É uma Interface de desenvolvimento integrada (IDE). Nessa interface pode ser desenvolvida diversos tipos de softwares de diferentes plataformas. No projeto específico utilizaremos nessa plataforma utilizaremos o plugin PlatformIO .	Será utilizado para o desenvolvimento do código em C do Arduino Mega Pro.
PlatformIO	É um conjunto de ferramentas para desenvolvimento de sistemas embarcados em C/C++. Em junho de 2019 passou a ser <i>open source</i> e com todas as funcionalidades gratuitas	Plugin para o VsCode
Matlab	É um software interativo de alta performance voltado para o cálculo numérico. O MATLAB integra análise numérica, cálculo com matrizes, processamento de sinais e construção de gráficos.	Utilizado para criar e simular o modelo matemático do robô.

Tabela 4.3 - Linguagem para programação do Arduino mega.

Tecnologia	Conceito	Aplicação no projeto
Linguagem C	É uma linguagem de programação compilada de propósito geral, estruturada, imperativa, procedural.	Neste projeto, será utilizada para o desenvolvimento do módulo firmware e sistema.

4.1 - DESENVOLVIMENTO DO PROTÓTIPO

Nesse capítulo será detalhado o desenvolvimento das principais interfaces tanto de hardware como de software que será utilizado nesse projeto. O microcontrolador utilizado é o Arduino com processador ATmega2560, contendo 16 linhas de PWM e 4 pares de comunicação serial, full duplex que pode ser configurada para 50000 bits por segundo, possui um relógio interno de 16Mhz, ideal para sistemas que necessitam adquirir dados críticos, como é o caso desse projeto.

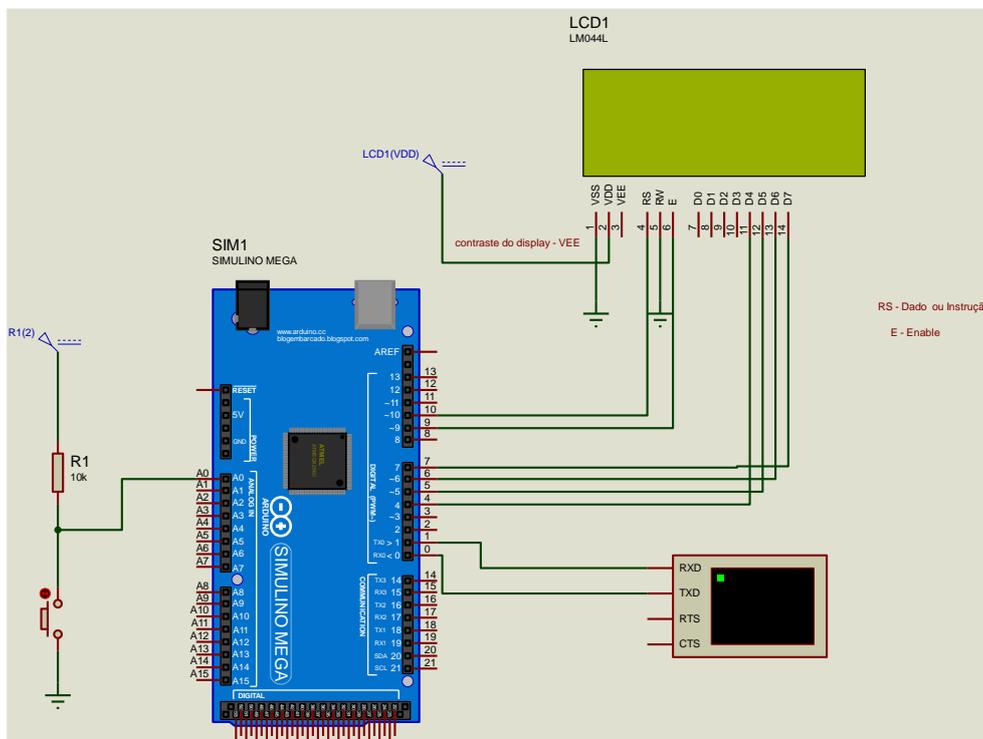
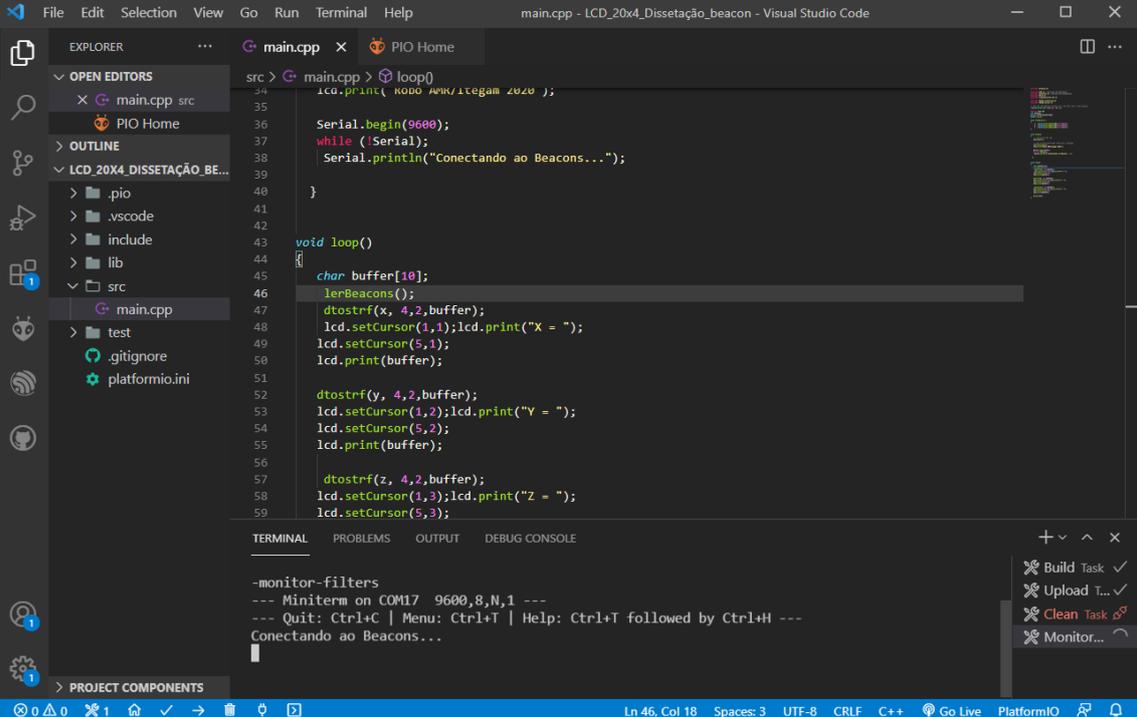


Figura 4.2 - Circuito eletrônico do Arduino com o LCD.

A Figura 4.2, mostra o circuito elétrico da interface do Arduino com o display de cristal líquido – LCD. Essa interface servira para mostrar as pessoas que irão fazer o

manuseio do robô sua rota, sua autonomia de bateria, bem como informações de localização do mesmo, conforme a Figura 4.3.



```
main.cpp - LCD_20x4_Dissetação_beacon - Visual Studio Code
EXPLORER
  OPEN EDITORS
    main.cpp src
  PIO Home
  OUTLINE
  LCD_20x4_DISSETAÇÃO_BE...
    .pio
    .vscode
    include
    lib
    src
      main.cpp
    test
    .gitignore
    platformio.ini
  PROJECT COMPONENTS

main.cpp
24 lcd.println( "Robo AMR/Itegam 2020" );
25
26
27 Serial.begin(9600);
28 while (!Serial);
29 Serial.println("Conectando ao Beacons...");
30
31 }
32
33 void loop()
34 {
35   char buffer[10];
36   lerBeacons();
37   dtostrf(x, 4,2,buffer);
38   lcd.setCursor(1,1);lcd.print("X = ");
39   lcd.setCursor(5,1);
40   lcd.print(buffer);
41
42   dtostrf(y, 4,2,buffer);
43   lcd.setCursor(1,2);lcd.print("Y = ");
44   lcd.setCursor(5,2);
45   lcd.print(buffer);
46
47   dtostrf(z, 4,2,buffer);
48   lcd.setCursor(1,3);lcd.print("Z = ");
49   lcd.setCursor(5,3);
50 }

TERMINAL
---monitor-filters
--- Miniterm on COM17 9600,8,N,1 ---
--- Quit: Ctrl+C | Menu: Ctrl+T | Help: Ctrl+T followed by Ctrl+H ---
Conectando ao Beacons...
```

Figura 4.3 - Código fonte para escrita no LCD.

A Figura 4.3, mostra o código fonte do display LCD, foi criada uma função chamada de “LCD.” Para tornar mais fácil a comunicação com o hardware do display, bem como facilitar o desenvolvimento do projeto. A Figura 4.4 mostra o resultado dessa interface. Através do display as informações que são processadas podem ser visualizadas no display.



Figura 4.4 - LCD mostrando as informações obtidas do Beacon.

O código fonte da Figura 4.3, uma vez gravado no firmware do Arduino mega, mostra as informações visualizadas na Figura 4.5.

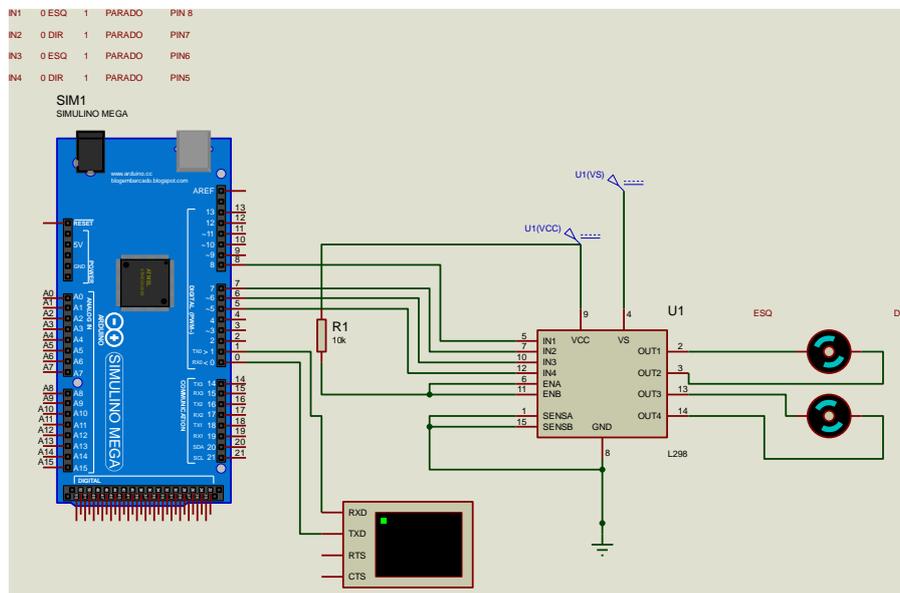


Figura 4.5 - Circuito eletrônico com Arduino para controle dos motores.

A Figura 4.6 mostra a interface gráfica entre o Arduino mega e o driver do motor, para efeito de protótipo a programação e testes de cada interface foram realizadas separadamente, evitando assim possíveis bugs de programação.

```

File Edit Selection View Go Run Terminal Help main.cpp - Aula02_02_STEM - Visual Studio Code
EXPLORER main.cpp x PIO Home
OPEN EDITORS
  x main.cpp src
  x PIO Home
OUTLINE
  AULA02_02_STEM
    .pio
    .vscode
    include
    lib
    src
      main.cpp
    test
    .gitignore
    platformio.ini
PROJECT COMPONENTS
main.cpp
54 pinMode(IN4, OUTPUT);
55
56 digitalWrite(IN1,1);
57 digitalWrite(IN2,1);
58 digitalWrite(IN3,1);
59 digitalWrite(IN4,1);
60
61 }
62
63 void loop() {
64 // put your main code here, to run repeatedly:
65 switch (mensagem)
66 {
67 case '1': /* constant-expression */
68 /* code */
69 M1_direita();
70 M2_direita();
71 break;
72
73 case '2':
74 M1_esquerda();
75 M2_esquerda();
76 break;
77
78 }
79
80 }
81
82
83 void serialEvent() {
84 while (Serial.available())
85 {
86 char inChar = (char)Serial.read();
87 expression = inChar;
88 Serial.println(expression);
89 }

```

Figura 4.6 - Código fonte para controle dos motores.

A Figura 4.6 mostra a interface de software desenvolvida para o driver do motor Figura 4.5, esse código utilizará as funções de PWM intrínsecas da biblioteca do próprio Arduino. Utilizando essa biblioteca fornecida pelo Arduino, torna mais rápida o desenvolvimento de aplicações que utilizam motores.

4.2 - PWM PARA CONTROLE DOS MOTORES DO ROBÔ

A modulação por largura de pulso (PWM) serve para controlar o valor da alimentação entregue à carga. A técnica PWM é bastante aplicada na eletrônica, principalmente nas fontes chaveadas. Além desta utilização, a técnica PWM também pode ser utilizada no controle de velocidade dos motores. Para controle de velocidade do driver do motor (Sabertooth), utilizaremos os pinos 13,12, e 11 do Arduino Mega, Figura 4.1. O período do PWM é sempre constante de 1.2ms, a largura de pulso PW tem valores de 1.5ms à 20ms, Figura 2.10. Dependendo da configuração do modulo Sabertooth, valores que compreende entre 1.5 a 20ms podem fazer com que o motor gire no sentido horário ou anti-horário, o código em linguagem C, para controlar o modulo Sabertooth é mostrado na Figura 4.2. PWM é a técnica usada para gerar sinais analógicos de um dispositivo digital como um Microcontrolador e ela é tão eficiente que hoje em dia quase todos os Microcontroladores modernos possuem hardware dedicado para a geração de sinais PWM. Neste artigo você vai aprender os conceitos básicos desta técnica e como ela pode ser amplamente aplicada no controle de dispositivos e até máquinas como ocorre no inversor de frequência, (SILVEIRA, 2016).

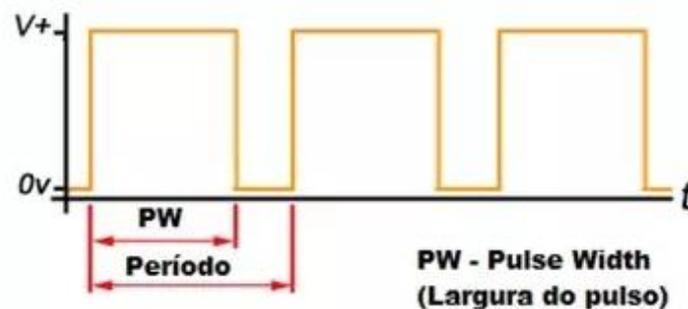


Figura 4.7 - Gráfico da largura de pulso.

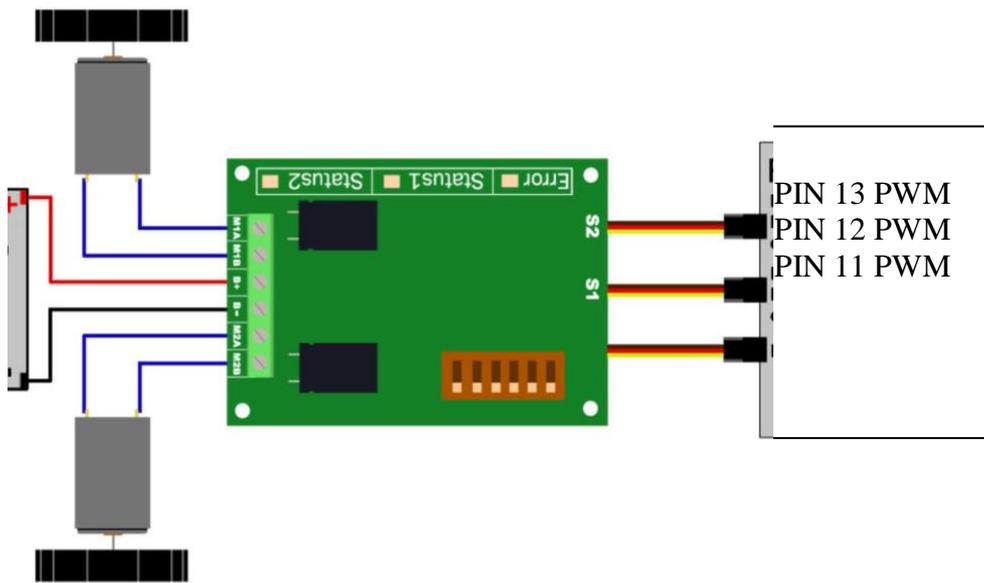


Figura 4.8 - Ligação elétrica entre o Arduino com o modulo Sabertooth.

A Figura 4.9 mostra o código desenvolvido para manipular os motores utilizando PWM. O PWM é usado para controlar a potência enviada aos motores, controlando assim a velocidade do robô.

```

5  Servo PWM1; // Cria os objetos PWM
6  Servo PWM2; // Cria os objetos PWM
7  Servo GIRO; // Cria os objetos PWM
8
9
10 int potpin = A0; // analog pin used to connect the potentiometer
11 int val; // variable to read the value from the analog pin
12
13 void setup() {
14   PWM1.attach(13); // PWM 1
15   PWM2.attach(12); // PWM 2
16   GIRO.attach(11); // PWM 3
17 }
18
19 void loop() {
20   val = analogRead(potpin); // reads the value of the potentiometer (value between 0 and 1023)
21   val = map(val, 0, 1023, 0, 180); // scale it for use with the servo (value between 0 and 180)
22   PWM1.write(val); // Controla motor esquerda
23   PWM2.write(val); // Controla motor direita
24   GIRO.write(val); // Controla o giro do robo
25   delay(15); // Aguarda 15ms
26 }

```

Building .pio\build\megaatmega2560\firmware.hex
Advanced Memory Usage is available via "PlatformIO Home > Project Inspect"
RAM: [] 2.1% (used 169 bytes from 8192 bytes)
Flash: [] 1.3% (used 3336 bytes from 253952 bytes)
===== [SUCCESS] Took 2.36 seconds =====
Terminal will be reused by tasks, press any key to close it.

Figura 4.9 - Código em C para controle PWM dos pinos do Arduino.

4.3 - CONTROLANDO OS MOTORES ATRAVÉS DE PID

Foram desenvolvidos códigos fonte para realizar acionamento de motores, e automatizar a correção de trajetória, como exemplo, foi primeiramente desenvolvido código para acionar/mover os motores utilizando PWM. Após os testes foram incluídos o código PID. O algoritmo de controle adotado teve seus parâmetros ajustados a partir do modelo matemático de Ziegler – Nichols (modificado), junto com a realização da calibração de motores, quanto melhor o ajuste dos seguintes parâmetros (k_p , k_i , e k_d) Figura 4.4, melhor será o desempenho do PWM. O código fonte foi planejado de forma a realizar as leituras dos dados obtidos do beacons, Figura 4.3 e através desses dados de posição recebida em tempo real, fazer o processamento e a correção da rota com o controle PID para que a trajetória tenha o menor erro possível. Efetuando correções na rota de forma automática, e a calibração dos motores havia sido feita anteriormente em outros experimentos Figura 4.3.

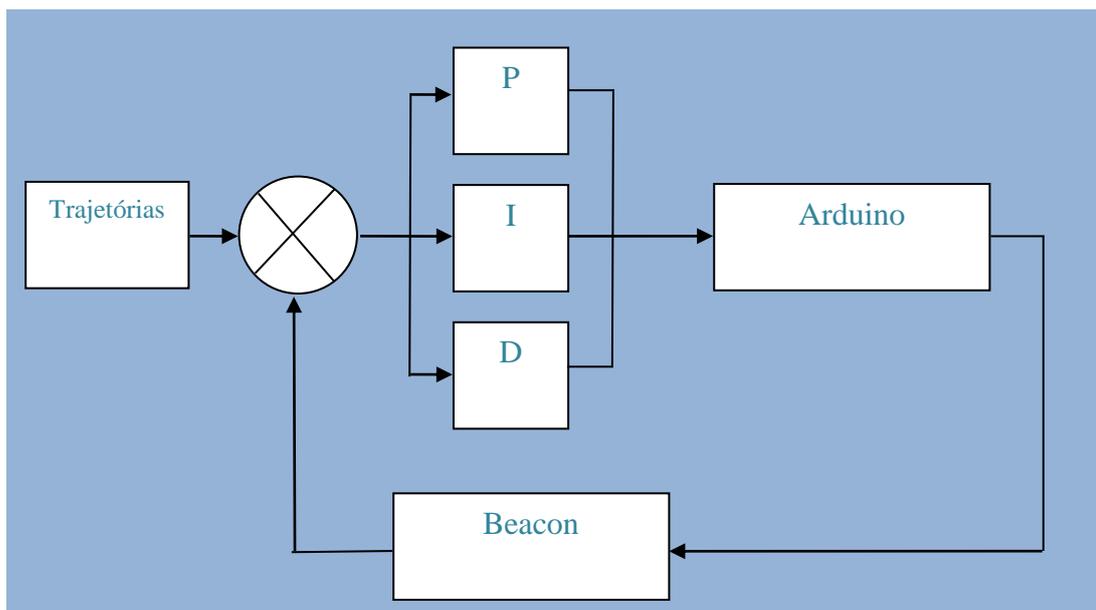


Figura 4.10 - Planta de controle PID

```
void SetTunings(double kp = 10, double ki = 0, double kd = 0)
{
    double SampleTimeInSec = ((double)SampleTime)/1000;
    kp = kp;
    ki = ki * SampleTimeInSec;
    kd = kd / SampleTimeInSec;
}

void SetSampleTime(int NewSampleTime)
{
    if (NewSampleTime > 0)
    {
        double ratio = (double)NewSampleTime/(double)SampleTime;
        ki *= ratio;
        kd /= ratio;
        SampleTime = (unsigned Long)NewSampleTime;
    }
}

void SetOutputLimits(double Min, double Max)
{
    if (Min > Max) return;
    outMin = Min;
    outMax = Max;
    if (Output > outMax) Output = outMax;
```

Figura 4.11 - Código fonte do controlador PID.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS

A tecnologia que vem sendo desenvolvida para veículos autônomos é bem impressionante. Em um futuro próximo teremos carros autônomos andando em rodovias comuns com a segurança e eficiência dos melhores pilotos humanos. Esses veículos autônomos utilizam diversos sensores para serem capazes de localizar a si mesmo em qualquer ambiente, eles também conseguem montar um plano bem detalhado para se locomover de sua localização atual para qualquer destino desejado. Esse trabalho mostra uma introdução sobre como esses veículos autônomos são capazes de seguir seu percurso desejado em ambiente indoor. O sistema de percepção robótica destina-se a imitar os vários componentes necessários para os humanos navegarem em seu ambiente.

Um importante objetivo na área de robótica é a criação de robôs autônomos. Tais robôs devem aceitar descrições de alto nível das tarefas que eles devem desenvolver, sem a necessidade de maiores intervenções humanas. As descrições de entrada especificam o que o usuário deseja que seja feito, e não como proceder para fazê-lo. Para tanto, estes robôs são equipados com atuadores e sensores sob controle de um sistema de computação (CHATILA,2015).

O desenvolvimento da tecnologia necessária para robôs autônomos engloba algumas ramificações como raciocínio automatizado, percepção e controle, surgindo vários problemas importantes. Entre eles, encontra-se o planejamento de trajetórias. De uma forma geral, este problema consiste em se descobrir de que forma se pode levar um objeto a partir de uma configuração (posição e direção) inicial até uma configuração final. Um caso particular deste problema é quando o objeto que se deseja movimentar é o próprio robô (FRAGAPANE, 2021).

Neste trabalho, são apresentados métodos para a navegação autônoma de robôs móveis em ambientes sobre os quais possui-se pouca ou nenhuma informação. O sistema opera em tempo real, utilizando os sonares do robô para fazer a detecção dos obstáculos, e interage com o sistema de controle do robô para rastreamento das trajetórias desejadas.

Um robô AMR pode ser considerado um agente inteligente autônomo, dotado de sensores e atuadores. Sendo um agente, o robô pode interagir com o meio onde navega, ou seja, realizar ações sobre este. Um robô inteligente deve levar em conta sua

capacidade de percepção e de seu próprio estado para tomar decisões sobre suas ações. Isso resulta, portanto, em um ciclo que envolve a preparação do ambiente, tomada de decisão através de um sistema de controle inteligente, realização de ação e finalmente a percepção da nova configuração do ambiente após a ação. Essa estrutura rege toda a interação entre o agente e o ambiente que o cerca, para qualquer que seja a função desempenhada. Podemos perceber daí a importância dos sensores e atuadores, e do algoritmo de controle embarcado no robô, Figura 5.1.



Figura 5.1 - Interação do robô com o ambiente.

Existem inúmeros métodos para localizar robôs móveis em ambientes fechados (*indoor*). Na base de todos os métodos de localização está a medição em tempo-real de um ou mais parâmetros, como ângulos ou distâncias. Através desta medição é obtida a localização do objeto, relativamente a um ou mais pontos fixos, cuja localização é conhecida. Estas medições são baseadas nas propriedades físicas de sinais eletromagnéticos ou ultrassônicos, como a velocidade ou atenuação. A posição do objeto é então calculada utilizando as medições efetuadas e a localização das posições fixas conhecidas. Através dos dados de localização indoor obtidos através do beacon, o robô obtém em temporal sua posição X_0, Y_0, Z_0 . Tendo em vista que a posição que se deseja atingir é a posição X_1, Y_1, Z_0 (para efeito de navegação essa coordenada Z é irrelevante). Primeiramente é necessário se calcular a distância D entre os pontos $P(X_1, Y_1)$ e $P(X_0, Y_0)$. Como já foi visto anteriormente, conforme o robô se movimenta haverá uma tendência natural do robô de ir mais para a direita ou mais para a esquerda, causando uma variação no ângulo $|\Delta\theta|$. Uma vez calculada a distância entre os pontos, podemos calcular o ângulo θ . Para se atingir o objetivo $P(X_1, Y_1)$ é necessário manter esse ângulo constante durante o percurso entre P_0 e P_1 , Figura 5.2.

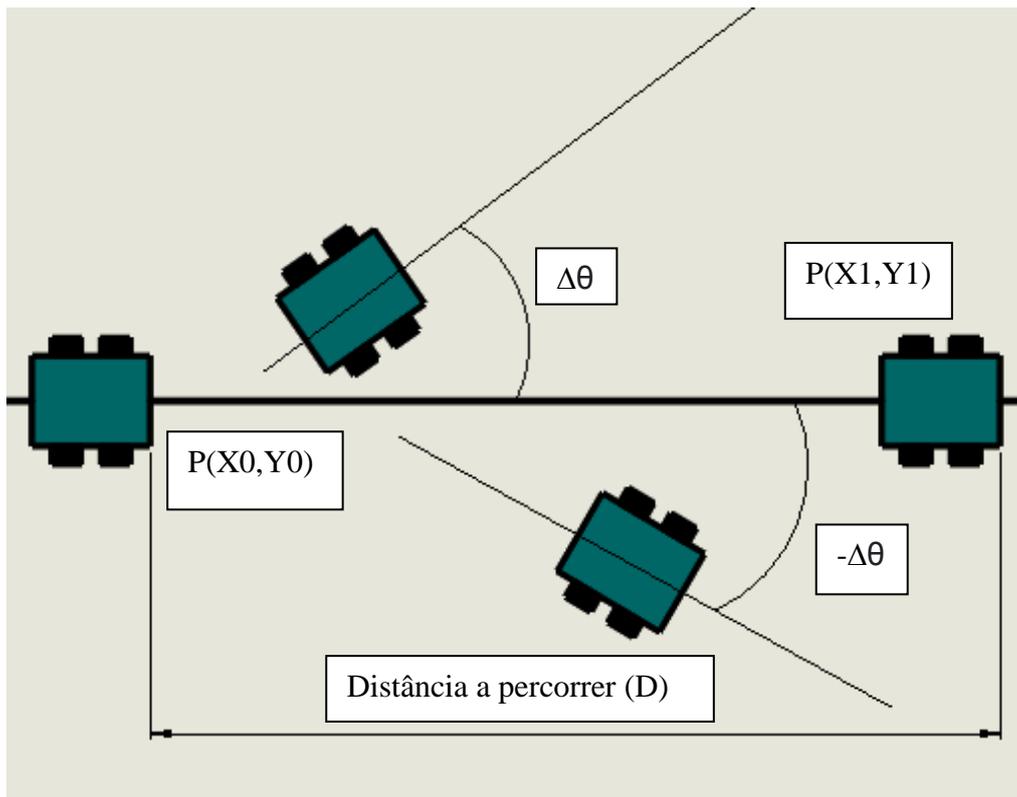


Figura 5.2 - Cálculo da trajetória do robô.

Durante a trajetória o robô poderá assumir diferentes ângulos, esses ângulos deverão ser os mais próximos de zero possível. Valores de alguns muito altos causam uma instabilidade no sistema. Podendo fazer que o robô não volte mais a sua trajetória, Figura 5.3.

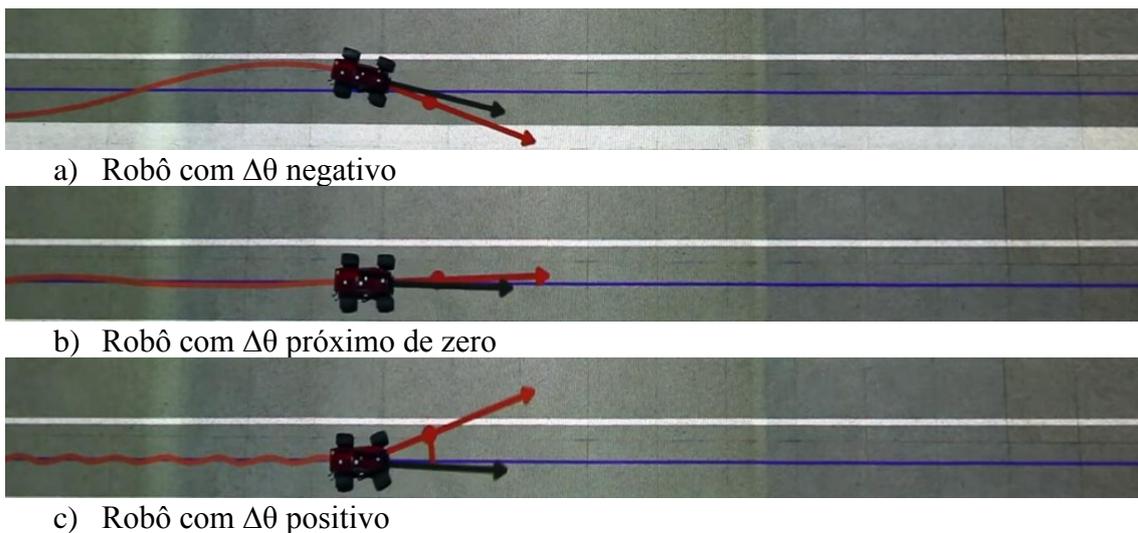


Figura 5.3 - Robô poderá assumir diferentes ângulos durante a sua trajetória.

A Figura 5.4 mostra o robô com um ângulo bastante $\Delta\theta$ elevado, podendo levar a instabilidade da navegação.

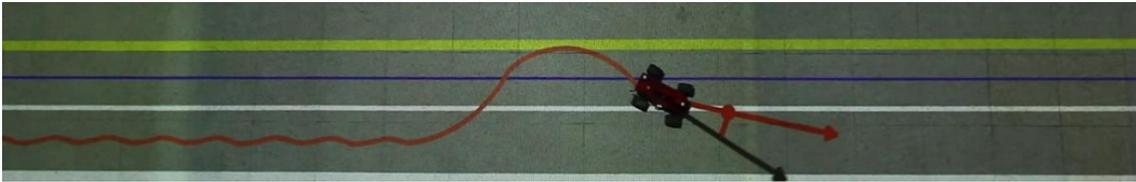


Figura 5.4 - Angulo elevado levando instabilidade no percurso do robô.

A Figura 5.5 mostra uma instabilidade na navegação, o ângulo $\Delta\theta$ elevado impossibilitou o retorno do robô a sua trajetória inicial.

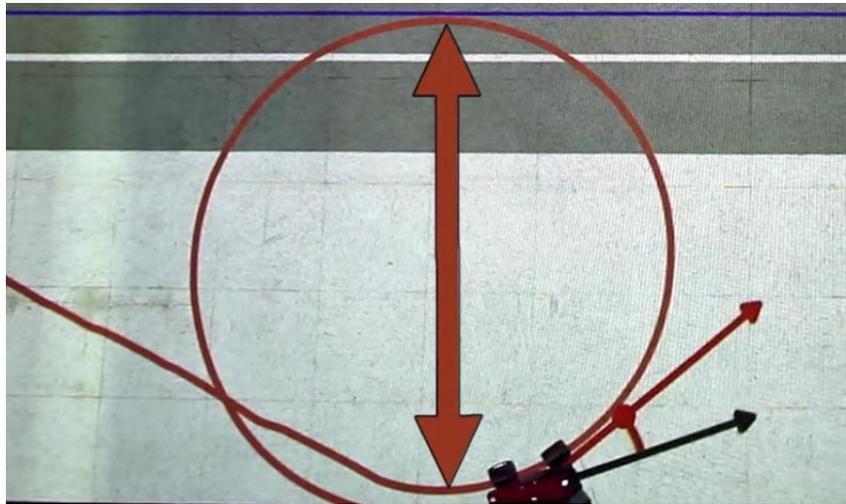


Figura 5.5 - Instabilidade na navegação do robô.

Para mantermos o ângulo $\Delta\theta$ próximo de zero foi utilizado o controle PID, Figura 5.6.



Figura 5.6 - Controle PID para estabilização do sistema.

Inicialmente precisamos criar um modelo matemático para o robô móvel Figura 5.7, a partir desse modelo será desenvolvido o projeto final. Para se criar um modelo

matemático iremos equacionar inicialmente supondo que o veículo tenha apenas duas rodas uma dianteira e uma traseira.

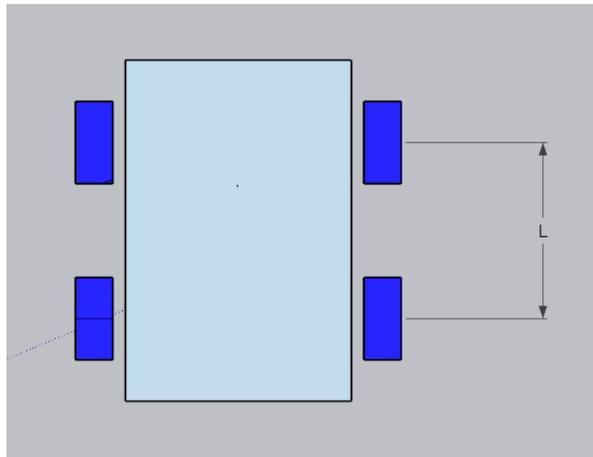


Figura 5.7 - Desenho do robô com distância entre rodas.

5.1 - MODELO MATEMÁTICO

Para criarmos um modelo matemático iremos considerar que a distância entre as rodas do robô é de L . Para obtermos esse modelo iremos inicialmente considerar que o robô tem apenas duas rodas, isso simplificará as equações matemáticas Figura 5.8.

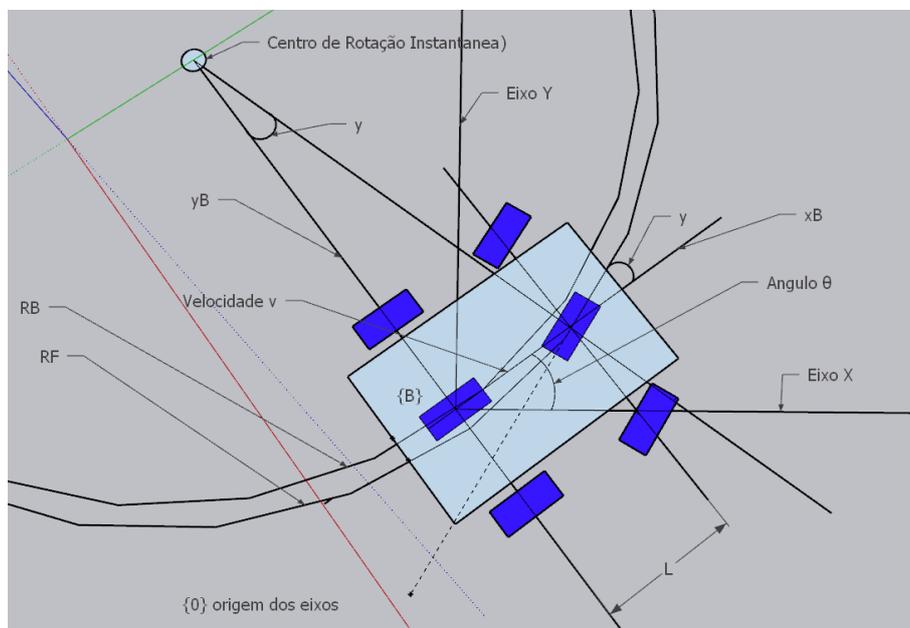


Figura 5.8 - Modelo matemático do robô ARM.

A posição inicial do robô é representada por $\{0\}$ origem dos eixos, as rodas se movem através do seu centro de rotação y , sua velocidade angular é dada pela Eq. (5.1):

$$\dot{\theta} = \frac{v}{R_B} \quad (5.1)$$

Por simples geometria o raio de giro $R_B = L/\tan \gamma$, onde L é o comprimento entre eixos do robô. Para um ângulo fixo do volante o robô se move ao longo de arco circular, por essa razão as curvas em estradas são arcos circulares, observamos que o raio $R_F > R_B$, o que significa que a roda dianteira deve seguir um caminho, mas longo e, por consequência gira mais rapidamente que a roda traseira. A velocidade do robô em cada eixo é dada por $(v \cos \theta, v \sin \theta)$. Combinando com a Eq. 5.1 podemos escrever a equação de movimento como:

$$\dot{x} = v \cos \theta$$

$$\dot{y} = v \sin \theta$$

$$\dot{\theta} = \frac{v}{L} \tan \gamma \quad (5.2)$$

Esse modelo Figura 5.9 é conhecido como modelo cinemático pois descreve as velocidades do veículo, mas não as forças ou torques que causam a velocidade. A Eq. (5.2) mostram algumas outras características importantes de um veículo semelhante a um carro. Quando $v=0$ então $\dot{\theta} = 0$; ou seja, não é possível mudar a orientação do veículo quando ele está parado. Como sabemos por dirigir, devemos nos mover para virar.

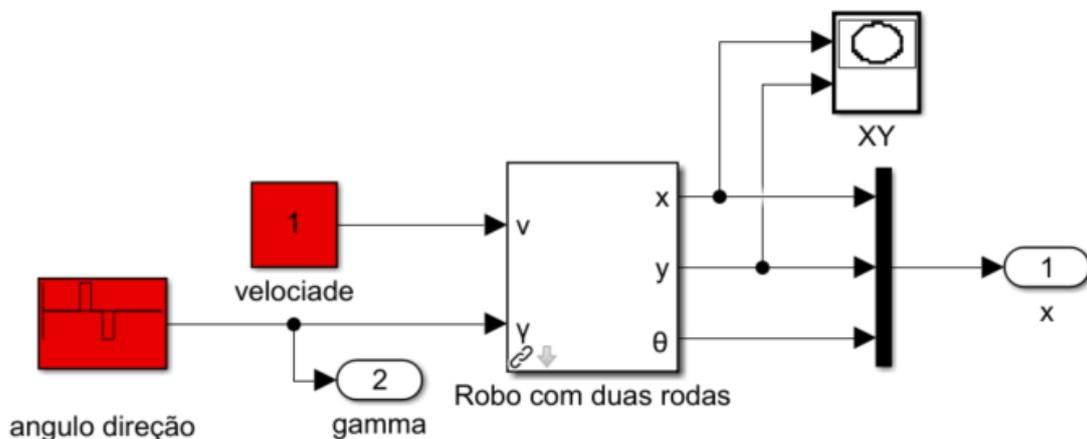


Figura 5.9 - Modelo matemático para o veículo robô de duas rodas.

O gráfico da Figura 5.10 mostra a velocidade, a aceleração e o espaço percorrido pelo robô.

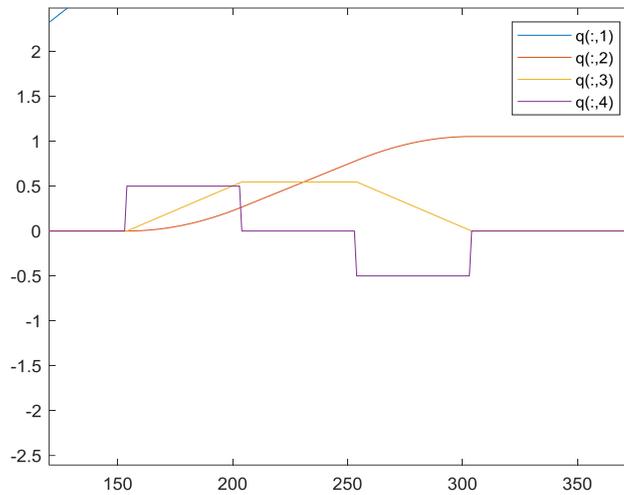


Figura 5.10 - Gráfico mostrando a saída do modelo matemático.

Quando o ângulo de direção $\gamma = \pi/2$ a roda dianteira está ortogonal à roda traseira, o veículo não pode se mover, logo uma região indefinida. Podemos então escrever uma equação para a uma componente Y em função da Eq. (5.2):

$$\dot{y} \cos \theta - \dot{x} \sin \theta = 0 \quad (5.3)$$

Através da Eq. (5.2) é implantando um modelo no software MATLAB, a entrada de velocidade é uma constante e o ângulo de giro do volante é um pulso positivo finito, seguido por um pulso negativo, o modelo irá simular o movimento do robô. Vamos com considerar a distância entre rodas de $L = 1$ para efeito de simulação.

A Figura 5.11, mostra o robô na posição P0, em cor azul os beacons estrategicamente, o robô receberá as informações de localização X, Y, Z pelos beacons. A trajetória que o robô deverá percorrer são dados por: P0, P1, P2, P3, P4, P5, P6, P7, P8 e retornando novamente para P0. Os pontos em amarelos são obstáculos ao longo do percurso. O robô deverá seguir a trajetória sem tocar nos obstáculos. A trajetória mostrada na figura é apenas uma linha imaginaria. Uma vez obtido os pontos P(X,Y), o robô percorrerá a distância entre os pontos.

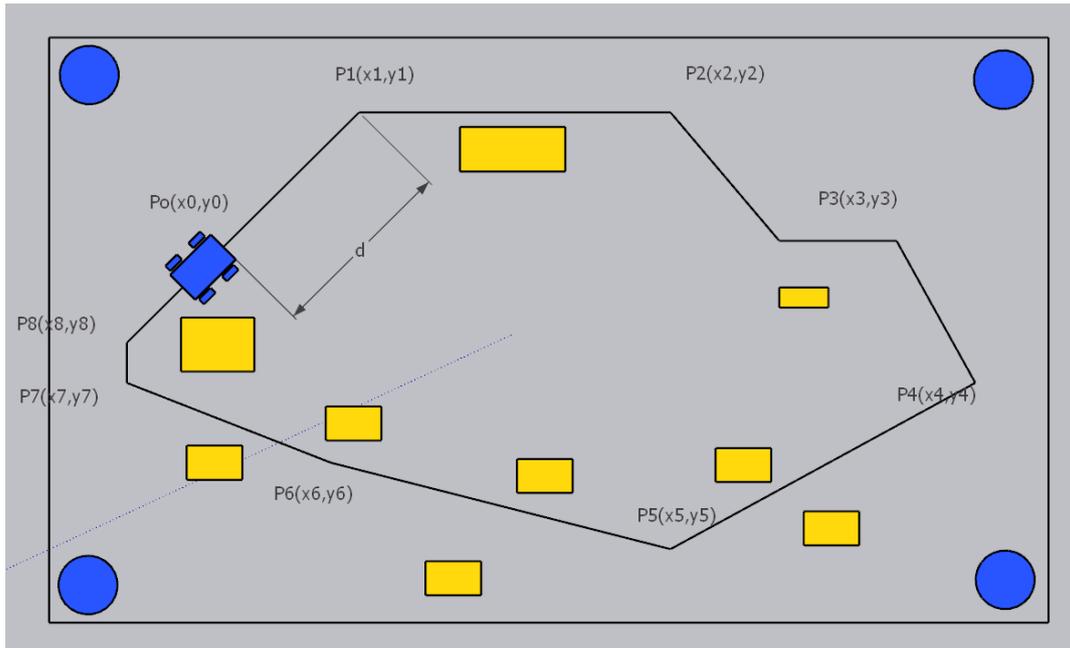


Figura 5.11 - Robô ARM seguindo uma trajetória.

5.2 - SEGUINDO UMA TRAJETÓRIA

O objetivo do robô é seguir uma trajetória imaginária pré-determinada essa trajetória é composta de pontos x,y conforme mostra a Figura 5.11. Um algoritmo simples de pontos $(x(t), y(t))$, pontos que devem ser percorridos em função do tempo. Através o receptor localizado no robô, os beacons estacionários mandam as informações de posição $P0(x0,y0)$. Para se atingir os pontos $P1(x1,y2)$ basta se calcular a distância D entre o ponto $P0$ e $P1$, traçando também uma linha entre dois pontos. O d^* é o erro que se ocorre quando se percorre a trajetória.

$$D = \sqrt{(x1^* - x2)^2 + (y2 - y1)^2} - d^* \quad (5.4)$$

$$v^* = k_v e + k_i \int e dt \quad (5.5)$$

Para controlar a velocidade do robô um controlador PI (proporcional – Integral) é implementado, Eq. 5.5. A velocidade atua para cada nova posição é dada por v^* (velocidade atual do robô).

$$\theta^* = \tan^{-1} \frac{y^* - y}{x^* - x} \quad (5.6)$$

É possível se calcular o ângulo θ^* que a nova posição P^* faz com o eixo. Um controlador proporcional é dado por:

$$\gamma = k_h(\theta^* - \theta) \mid k_h > 0 \quad (5.7)$$

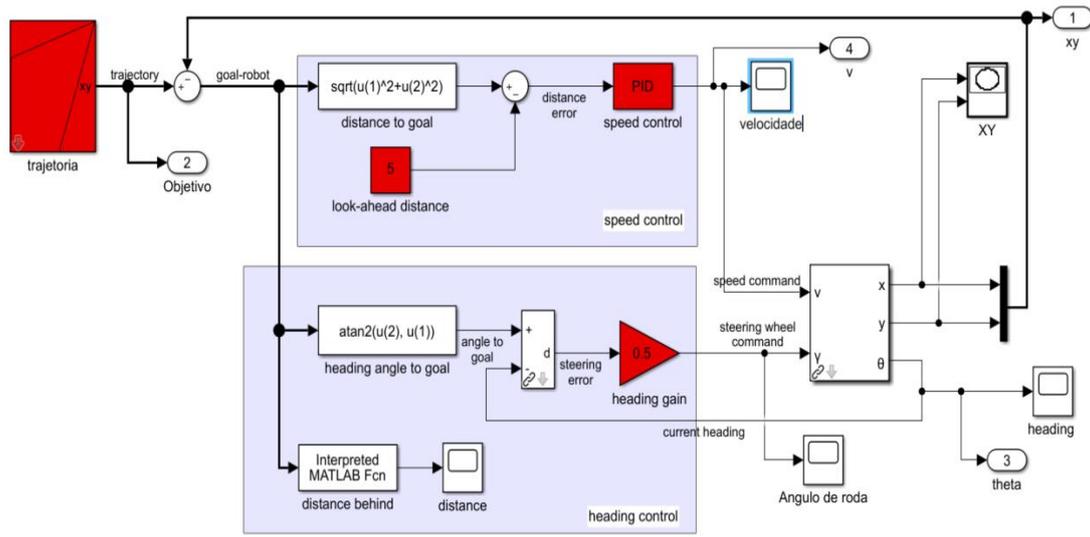


Figura 5.12 - Modelo matemático com controlador PI.

Para validarmos o modelo matemático foram inseridas algumas coordenadas cartesianas listadas na Tabela 5.1, a Figura 5.12 mostra o gráfico de saída do modelo matemático. Podemos verificar pelo gráfico que a trajetória está de acordo com os pontos (X,Y) da Tabela 5.1.

Tabela 5.1 - Coordenadas cartesianas para teste do robô.

[10 10; 20 40; 40 80; 90 80; 80 40; 30 10]
--

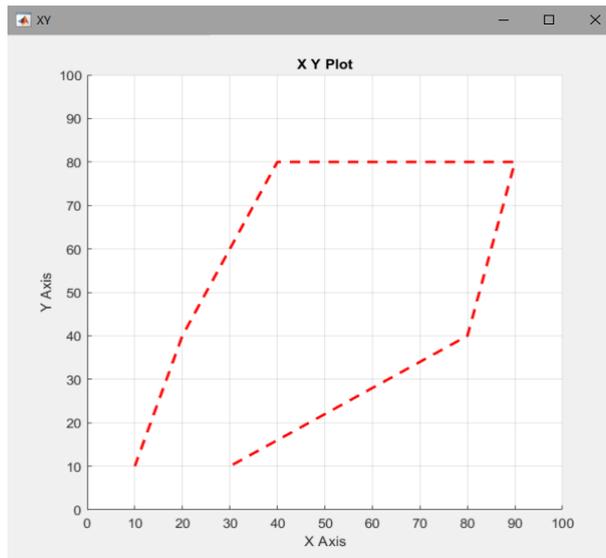


Figura 5.13 - Gráfico de saída do robô com trajetória.

5.3 - TESTE DE VALIDAÇÃO

Foram instalados em posição estratégica os beacons (Figura 5.14) de localização e um instalado na parte superior do robô, foram colocados no ambiente de teste e validação alguns obstáculos no percurso do robô, o mesmo deveria se movimentar desviando-se dos obstáculos. Um vídeo do teste pode ser visto no endereço (<https://youtu.be/4F7OVMLbuHk>).



Figura 5.14 - Beacon instalado no robô.

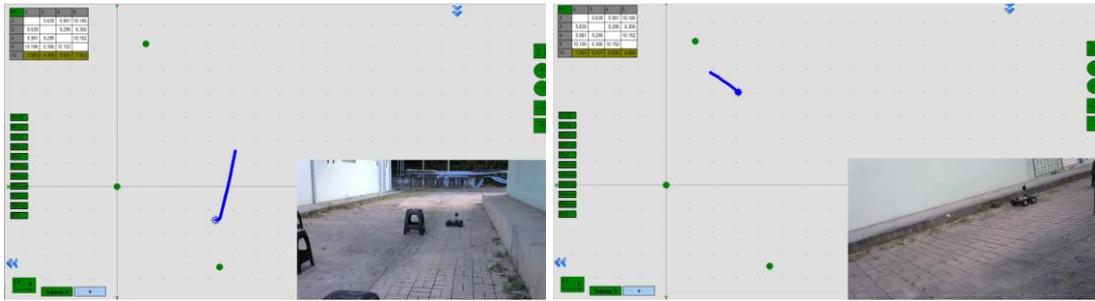


Figura 5.15 - Teste de validação.

A Figura 5.15, mostra o teste de validação do protótipo do robô ARM. A faixa em azul mostra a trajetória do robô, a imagem no lado direito inferior é o deslocamento em tempo real. Os beacons objetivos circular em verde na imagem maior, passam ao robô as coordenadas (X,Y,Z) , para esse projeto o eixo Z foi descartado uma vez que é irrelevante.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

6.1 - CONCLUSÕES

O abastecimento automático de linha utilizando robôs moveis inteligentes ARM é a solução para as empresas que necessitam de transporte de materiais e insumos dentro das fábricas, uma vez que o transporte de materiais não agrega valor aos produtos da empresa. Os robôs móveis levarão os itens a serem produzidos até a linha de montagem e os entregam a outros robôs (estáticos) ou operadores, utilizando sensores eles serão capazes de trabalhar em conjunto com pessoas, os chamados robôs colaborativos. Diversos benefícios são obtidos com seu uso, a redução de erros e perdas - Como os processos são digitalizados, inteligentes e autônomos, a precisão é muito maior. O operador não precisa procurar referências e localizações no meio do estoque, ou contabilizar por conta própria os itens necessários e retirá-los e colocá-los na linha, por exemplo. A necessidade de trabalho manual é muito menor, o que reduz erros e desperdícios. Com isso, há menos necessidade de retrabalho, problemas com extravios e outros empecilhos que podem comprometer as entregas, custos e produtividade. Os processos serão mais organizados, sem uso de papeladas e relatórios tudo controlado por software sem uso de intervenção humana, uma vez que o robô tendo a localização de onde e para onde fará a busca e entrega de materiais. Teremos mais agilidade no tempo de entrega de materiais uma vez que não haverá parada na entrega de produtos.

Os processos correrão automaticamente, sem necessidade de transmissão de ordens, busca de itens e deslocamento humano. Os robôs possuem capacidade de trabalho muito maior que a dos humanos, com menos pausas, mais rapidez no deslocamento e maior carregamento de cargas por vez. Maior segurança, funcionários que faziam funções insalubres de transporte de materiais como produtos químicos poderão ser realocados para outras funções, riscos de acidentes e lesões que são comuns em transporte devido ao peso e manuseio serão evitados. A empresa poderá alocar os funcionários em funções, mas motivadoras, de maior valor agregado e que sejam satisfatórias. Com isso, uma maior produtividade devido termos processos mais rápidos e confiáveis, uma vez que não teremos mais parada de linha por falta de materiais ou erro no abastecimento. Aumentando a satisfação do cliente final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AHAMED, D. S. S. R. The role of zigbee technology in future data communication system. **Journal of Theoretical and Applied Information Technology**, 2009.

AHMAD, A. *et al.* Remote control temperature chamber for virtual laboratory. In: 2017 **IEEE 9th International Conference on Engineering Education (ICEED)**. IEEE, 2017. p. 206-211.

AL-AMMAR, M. A. *et al.* Comparative survey of indoor positioning technologies, techniques, and algorithms. In: 2014 **International Conference on Cyberworlds**. IEEE, 2014. p. 245-252.

ALCÁCER, V.; CRUZ-MACHADO, V. Scanning the industry 4.0: A literature review on technologies for manufacturing systems. **Engineering science and technology, an international journal**, v. 22, n. 3, p. 899-919, 2019.

ANWAR, M. *et al.* **Performance Enhancement of Solar Energy using PID controller based DC-DC boost converter**. 2017. Tese de Doutorado. Department of Electrical and Electronic Engineering, Islamic University of Technology.

ASTRÖM, K. J.; HÄGGLUND, T. Revisiting the Ziegler–Nichols step response method for PID control. **Journal of process control**, v. 14, n. 6, p. 635-650, 2004.

BARROSO, V. P. B. **Posicionamento colaborativo em redes Wi-Fi - Where@UM3**. Minho, Portugal. 2015.

BELMONTE-FERNÁNDEZ, Ó. *et al.* An indoor positioning system based on wearables for ambient-assisted living. **Sensors**, v. 17, n. 1, p. 36, 2017.

BERZ, E. L. **Sistema híbrido de localização indoor**. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2015.

BETZ, J. W. **Engineering satellite-based navigation and timing: global navigation satellite systems, signals, and receivers**. John Wiley & Sons, 2015.

BISDIKIAN, C. An overview of the Bluetooth wireless technology. **IEEE Communications magazine**, v. 39, n. 12, p. 86-94, 2001.

BROOKS, R. A robust layered control system for a mobile robot. **IEEE journal on robotics and automation**, v. 2, n. 1, p. 14-23, 1986.

CATTANEO, O. *et al.* **Joining, upgrading and being competitive in global value chains: a strategic framework.** World Bank Policy Research Working Paper, n. 6406, 2013.

CHATILA, R.; LAUMOND, J. Position referencing and consistent world modeling for mobile robots. In: Proceedings. 1985 **IEEE International Conference on Robotics and Automation.** IEEE, 1985. p. 138-145.

CHHABRA, N. Comparative analysis of different wireless technologies. **International Journal of Scientific Research in Network Security & Communication**, v. 1, n. 5, p. 3-4, 2013.

CRAIG, A. B. **Understanding augmented reality: Concepts and applications.** Newnes, 2013.

CURY, H. **Poluição indoor.** Veja Saúde, 2019.

DA SILVA, E. Logística 4.0: Desafios e inovações. **IX Congresso brasileiro de engenharia de produção**, 2019.

DALENOGARE, L. S. *et al.* The expected contribution of Industry 4.0 technologies for industrial performance. **International Journal of Production Economics**, v. 204, p. 383-394, 2018.

DALMARCO, G.; BARROS, A. C. Adoption of Industry 4.0 technologies in supply chains. In: **Innovation and Supply Chain Management.** Springer, Cham, 2018. p. 303-319.

DAVIES, A. C. An overview of bluetooth wireless technology/sup tm/and some competing lan standards. In: ICCSC'02. 1st **IEEE International Conference on Circuits and Systems for Communications.** Proceedings (IEEE Cat. No. 02EX605). IEEE, 2002. p. 206-211.

DAVIS, H. Absolute beginner's guide to Wi-Fi wireless networking. **Que Publishing**, 2004.

DEMENTYEV, A. *et al.* Power consumption analysis of Bluetooth Low Energy, ZigBee and ANT sensor nodes in a cyclic sleep scenario. In: 2013 **IEEE International Wireless Symposium (IWS)**. IEEE, 2013. p. 1-4.

DIEZ-OLIVAN, A. *et al.* Data fusion and machine learning for industrial prognosis: Trends and perspectives towards Industry 4.0. **Information Fusion**, v. 50, p. 92-111, 2019.

DING, G. *et al.* Overview of received signal strength based fingerprinting localization in indoor wireless LAN environments. In: 2013 5th **IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications**. IEEE, 2013. p. 160-164.

DOPICO, M. *et al.* A vision of industry 4.0 from an artificial intelligence point of view. In: Proceedings on the international conference on artificial intelligence (ICAI). **The Steering Committee of The World Congress in Computer Science, Computer Engineering and Applied Computing (WorldComp)**, 2016. p. 407.

EL-RABBANY, A. **Introduction to GPS: the global positioning system**. Artech house, 2002.

ENGST, A.; FLEISHMAN, G. **The Wireless Networking Starter Kit: The Practical Guide to Wi-Fi Networks for Windows and Macintosh**. p. 55-77, 2003.

EXEL, R.; GADERER, G.; LOSCHMIDT, P. Localization of wireless LAN nodes using accurate TDoA measurements. In: 2010 **IEEE Wireless Communication and Networking Conference**. IEEE, 2010. p. 1-6.

FERRO, E.; POTORTI, F. Bluetooth and Wi-Fi wireless protocols: a survey and a comparison. **IEEE Wireless Communications**, v. 12, n. 1, p. 12-26, 2005.

FOIX, S.; ALENYA, G.; TORRAS, C. Lock-in time-of-flight (ToF) cameras: A survey. **IEEE Sensors Journal**, v. 11, n. 9, p. 1917-1926, 2011.

FONG-CHWEE, T.; SIRISENA, H. R. Self-tuning PID controllers for dead time processes. **IEEE Transactions on industrial electronics**, v. 35, n. 1, p. 119-125, 1988.

FRAGAPANE, G. *et al.* Planning and control of autonomous mobile robots for intralogistics: Literature review and research agenda. **European Journal of Operational Research**, 2021.

GAST, M. **802.11 wireless networks: the definitive guide.** " O'Reilly Media, Inc.", 2005.

GHOBAKHLOO, M. The future of manufacturing industry: a strategic roadmap toward Industry 4.0. **Journal of Manufacturing Technology Management**, 2018.

GILLARD, G. **An introduction and tutorial for PID controllers.** Kättesaadav. Disponível em: <http://smithsrobot.weebly.com/uploads/6/0/9/5/60954939/pid_control_document.pdf>. Acesso em: 20 de janeiro de 2019.

GOLLEDGE, R. G. *et al.* A geographical information system for a GPS based personal guidance system. **International Journal of Geographical Information Science**, v. 12, n. 7, p. 727-749, 1998.

GRAHAM C. GOODWIN, S. F. G. M. E. S. **Control System Desig.** Prentice Hall PTR, 2020.

GREJNER-BRZEZINSKA, D.; KEALY, A. 1 Positioning and Tracking Approaches and Technologies. **Advanced Location-Based Technologies and Services**, p. 1, 2004.

GREWAL, M. S.; WEILL, L. R.; ANDREWS, A. P. **Global positioning systems, inertial navigation, and integration.** John Wiley & Sons, 2007.

HA, Q. P.; YEN, L.; BALAGUER, C. Robotic autonomous systems for earthmoving in military applications. **Automation in Construction**, v. 107, p. 102934, 2019.

HARDER, P. A guide to wireless technologies. **ASHRAE Journal**, v. 53, n. 2, p. 44-48, 2011.

HAR-SHAI, L. *et al.* Inter-piconet scheduling in bluetooth scatternets. In: **Proc. Opnetwork**. 2002.

HEDGECOCK, W. *et al.* High-accuracy differential tracking of low-cost GPS receivers. In: **Proceeding of the 11th annual international conference on Mobile systems, applications, and services**. 2013. p. 221-234.

HEHN, M. *et al.* High-accuracy localization and calibration for 5-DoF indoor magnetic positioning systems. **IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement**, v. 68, n. 10, p. 4135-4145, 2018.

HODSON, R.; SULLIVAN, T. A. **The social organization of work**. Cengage Learning, 2012.

IVANOV, M. M. **The future of mobile robots in industrial environment**. 2017. Tese de Doutorado. Wien.

JANTZEN, J.; JAKOBSEN, C. Turning PID controller tuning into a simple consideration of settling time. In: 2016 **European Control Conference (ECC)**. IEEE, 2016. p. 370-375.

JANUSZKIEWICZ, Ł. *et al.* Wireless indoor positioning system with inertial sensors and infrared beacons. In: 2016 10th **European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP)**. IEEE, 2016. p. 1-3.

KAH, P. *et al.* Robotic arc welding sensors and programming in industrial applications. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering**, v. 10, n. 1, p. 1-16, 2015.

KAR, A. K. *et al.* Automated guided vehicle navigation with obstacle avoidance in normal and guided environments. In: 2016 11th **International Conference on Industrial and Information Systems (ICIIS)**. IEEE, 2016. p. 77-82.

KENNEDY, M. **The global positioning system and GIS**. CRC Press, 2002.

KHALAF-ALLAH, M. Time of arrival (TOA)-based direct location method. In: 2015 16th **International Radar Symposium (IRS)**. IEEE, 2015. p. 812-815.

KHAN, A.; TUROWSKI, K. A survey of current challenges in manufacturing industry and preparation for industry 4.0. In: **Proceedings of the First International Scientific Conference**, "Intelligent Information Technologies for Industry" (IITI'16). Springer, Cham, 2016. p. 15-26.

KURGAN, L. **Close up at a distance: Mapping, technology, and politics**. MIT Press, 2013.

LANGLEY, R. B.; TEUNISSEN, P. JG; MONTENBRUCK, O. Introduction to GNSS. In: Springer handbook of global navigation satellite systems. **Springer**, Cham, 2017. p. 3-23.

LINDH, J. **Bluetooth low energy beacons**. Texas Instruments, p. 2, 2015.

LOUREIRO, A. A. F. *et al.* Redes de sensores sem fio. In: **Simpósio Brasileiro de Redes de Computadores (SBRC)**. sn, 2003. p. 179-226.

LUO, X.; O'BRIEN, W. J.; JULIEN, C. L. Comparative evaluation of Received Signal-Strength Index (RSSI) based indoor localization techniques for construction jobsites. **Advanced Engineering Informatics**, v. 25, n. 2, p. 355-363, 2011.

MARIMOTO, C. E. **Sistema de navegação indoor usando o campo magnético da terra**. Hardware, 10 jul. 2012. Disponível em: <<https://www.hardware.com.br/noticias/2012-07/indooratlas.html>>. Acesso em: 10 de julho de 2021.

MATOS, R. F. F. D. **Sistemas de localização com base em tecnologia sem fios**. Universidade de Aveiro, 2010.

MATTI SIEKKINEN, M. H. J. K. N. **How Low Energy is Bluetooth Low Energy?** Comparative Measurements with ZigBee/802.15.4. WCNC 2012 Workshop on Internet of Things Enabling Technologies, Embracing Machine-to-Machine Communications and Beyond, 2012.

MAZARI, F. B. *et al.* **Novel portable device to analyze the moisture permeability of car seat**. Indústria Textila, v. 69, n. 3, p. 183-189, 2018.

MCDERMOTT-WELLS, P. Bluetooth scatternet models. **IEEE potentials**, v. 23, n. 5, p. 36-39, 2004.

MEGOWAN, P. J.; SUVAK, D. W.; KNUTSON, C. D. **IrDA infrared communications: An overview**. Counterpoint Systems Foundry, INC, v. 96, 1996.

MESSINA, E.; JACOFF, A.; SCOTT, H. Performance Evaluation of Autonomous Mobile Robots. **Intelligent Vehicle Systems: A D**, v. 4, p. 247-282, 2006.

MIORANDI, D.; ZANELLA, A. On the optimal topology of bluetooth piconets: Roles swapping algorithms. In: **Proc. Mediterranean Conference on Ad Hoc Networks MedHoc**. 2002.

MITTELSTADT, R. S. **Bluepath: Sistema de Localização Indoor**. Universidade do Vale do Taquari - Univates, 2018.

MÜLLER, J. M.; BULIGA, O.; VOIGT, K. I. Fortune favors the prepared: How SMEs approach business model innovations in Industry 4.0. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 132, p. 2-17, 2018.

NASIR, A. **Comprehensive fault tolerance and science-optimal attitude planning for spacecraft applications**. 2012. Tese de Doutorado. University of Michigan.

OLIVEIRA, R. **Logística 4.0: aplicações e benefícios para a indústria**. Desenvolvimento de Negócios, 2019.

PARK, B. Y.; JEONG, M. H.; PARK, S. O. A magneto-dielectric handset antenna for LTE/WWAN/GPS applications. **IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters**, v. 13, p. 1482-1485, 2014.

PATRICIO, R.; MENDES, A. **Consumption Patterns and the Advent of Automated Guided Vehicles, and the Trends for Automated Guided Vehicles**. Current Robotics Reports, v. 1, n. 3, p. 145-149, 2020.

PAVEL KRIZ, F. M. A. T. K. **Improving Indoor Localization Using Bluetooth Low Energy Beacons**. Hindawi Publishing Corporation, 2016.

PON, B. **Smartphones, Apps, and Digital Flows: Platform Competition in the Mobile Industry**. University of California, Davis, 2015.

PRIWGHARM, R.; CHEMTANOMWONG, P. A comparative study on indoor localization based on RSSI measurement in wireless sensor network. In: 2011 eighth **International Joint Conference on Computer Science and Software Engineering (JCSSE)**. IEEE, 2011. p. 1-6.

PRODANOV, C. C. **Metodologia do trabalho científico [recurso eletrônico]: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2. ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

REIS, J. W. W. R. A. PID Control of Continuous Processes. **Programmable Logic Controllers**, Fourth Edition, Prentice Hall PTR, 2020.

RIOS-MARTINEZ, J.; SPALANZANI, A.; LAUGIER, C. Understanding human interaction for probabilistic autonomous navigation using Risk-RRT approach. In: 2011 **IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems**. IEEE, 2011. p. 2014-2019.

ROSIQUE, F. *et al.* A systematic review of perception system and simulators for autonomous vehicles research. **Sensors**, v. 19, n. 3, p. 648, 2019.

SALAZAR, J. **Wireless networks**. Czech Technical University of Prague, Faculty of Electrical Engineering, p. 7, 2017.

SANTOS, M. A. D. **Localização em ambientes internos utilizando PDR e Wi-Fi**. UFAM, 2018.

SEVERINO, A. J. **Metodologia do trabalho científico**. 24. ed. São Paulo: Cortez, 2014.

SHAMSUZZOHA, M.; SKOGESTAD, S. The setpoint overshoot method: A simple and fast closed-loop approach for PID tuning. **Journal of Process control**, v. 20, n. 10, p. 1220-1234, 2010.

SIEGWART, R.; NOURBAKHSI, I. R.; SCARAMUZZA, D. **Introduction to autonomous mobile robots**. MIT press, 2011.

SILVEIRA, C. B. **O que é PWM e Para que serve?** Citisystems, 2016.

SOUSA, F. **O que é ZigBee, Saiba tudo sobre o protocolo para IoT e casa conectada**. Techtudo. Disponível em: <<https://www.techtudo.com.br/noticias/2019/12/o-que-e-zigbee-saiba-tudo-sobre-o-protocolo-para-iot-e-casa-conectada.ghml>>. Acesso em: 11 de julho de 2021.

STRANDHAGEN, J. W. *et al.* The fit of Industry 4.0 applications in manufacturing logistics: a multiple case study. **Advances in Manufacturing**, v. 5, n. 4, p. 344-358, 2017.

TIPPENHAUER, N. O. *et al.* On the requirements for successful GPS spoofing attacks. In: **Proceedings of the 18th ACM conference on Computer and communications security**. 2011. p. 75-86.

TORRES, G. F. **Explicando a Teoria PID**. ni.com, 2020.

VOLPATO, D. P.; ECO, L. L. **Multilateration IP**. Universidade Federal de Santa Catarina, 2018.

VYSOCKY, A. L. E. S.; NOVAK, P. Human-Robot collaboration in industry. **MM Science Journal**, v. 9, n. 2, p. 903-906, 2016.

WANG, Y. *et al.* Bluetooth positioning using RSSI and triangulation methods. In: 2013 **IEEE 10th Consumer Communications and Networking Conference (CCNC)**. IEEE, 2013. p. 837-842.

WILLIAMS, S.; MILLAR, I. The IrDA Platform. In: **Insights into mobile multimedia communications**. Academic Press, 1999. p. 593-608.

WOŹNY, E. A. **The implementation of the localization algorithm in the ARM Cortex-A8 system**. 2017. Tese de Doutorado. Instytut Radioelektroniki i Technik Multimedialnych.

WU, C. *et al.* Indoor positioning system based on inertial MEMS sensors: Design and realization. In: 2016 **IEEE International Conference on Cyber Technology in Automation, Control, and Intelligent Systems (CYBER)**. IEEE, 2016. p. 370-375.

ZAFARI, F.; GKELIAS, A.; LEUNG, K. K. A survey of indoor localization systems and technologies. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 21, n. 3, p. 2568-2599, 2019.

ZHOU, K.; LIU, T.; ZHOU, L. Industry 4.0: Towards future industrial opportunities and challenges. In: **2015 12th International conference on fuzzy systems and knowledge discovery (FSKD)**. IEEE, 2015. p. 2147-2152.

ZOGG, J. M. GPS basics. **Thalwil, Switzerland**, U-Blox, 2002.