

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO RIO GRANDE DO SUL
UNIDADE UNIVERSITÁRIA PORTO ALEGRE
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM AUTOMAÇÃO INDUSTRIAL

RAFAEL PEREIRA GONÇALVES

**ESTUDO DE SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO EM TRANSPORTADORES
AUTÔNOMOS**

PORTO ALEGRE
2021

RAFAEL PEREIRA GONÇALVES

ESTUDO DE SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO EM TRANSPORTES AUTÔNOMOS

Monografia a apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Automação Industrial na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. João Alvarez Peixoto.

PORTO ALEGRE

2021

Catálogo de Publicação na Fonte

G635e	<p>Gonçalves, Rafael Pereira. Estudo de sistemas de navegação em transportadores autônomos. / Rafael Pereira Gonçalves. – Porto Alegre, 2021. 57 f.</p> <p>Orientador: Prof. Dr. João Alvarez Peixoto.</p> <p>Monografia (graduação) – Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, Curso Superior de Tecnologia em Automação Industrial, Unidade em Porto Alegre, 2021.</p> <p>1. Sistemas de controle clássico. 2. AVG. 3. Caracterização. 4. Resposta ao degrau. I. Gonçalves, Rafael Pereira. II. Título.</p>
-------	--

Ficha catalográfica elaborada pelo Sistema Bibliotecas da Uergs.

RAFAEL PEREIRA GONÇALVES

**ESTUDO DE SISTEMAS DE NAVEGAÇÃO EM TRANSPORTADORES
AUTÔNOMOS**

Monografia a apresentada como requisito parcial para obtenção do título de Tecnólogo em Automação Industrial na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul.

Orientador: Prof. Dr. João Alvarez Peixoto.

Aprovado em: 22 / 01 / 2021

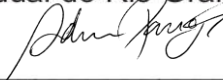
BANCA EXAMINADORA



Orientador: Prof. Dr. João Alvarez Peixoto
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS



Prof. Dr. André Borin Soares
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS



Profa. Dra. Adriane Parraga
Universidade Estadual do Rio Grande do Sul – UERGS

PORTO ALEGRE

2021

Dedico este trabalho a meus pais, em especial ao meu pai que foi o meu grande incentivador e exemplo desde sempre.

AGRADECIMENTOS

A todos que de certa forma colaboraram nessa jornada, em especial a minha família que participou e me ajudou.

Aos meus colegas de curso por todo apoio prestado, nas soluções de dúvidas e por se tornarem pessoas de meu convívio, grandes amigos, onde muitas vezes passei mais tempo que com a minha própria família.

Aos meus pais, Luciano e Silvia, que me apoiaram em tudo que precisei e nunca me deixarão desistir dos meus sonhos.

A minha esposa, Indianara, que me ajudou nesta tão importante fase da minha vida.

Aos meus avós já falecidos, Maria e Henrique.

A minha avó Anastácia, que sempre me incentivou.

Ao meu professor orientador João, por me guiar neste caminho, auxiliando, cobrando e me guiando nessa etapa tão importante na minha vida.

Ao grande criador do universo, a quem tudo é devido.

RESUMO

A utilização de veículos guiados autonomamente tem se tornado um bom recurso para o transporte de materiais em manufatura, de uma estação a outra. E diversos são os meios de sensoriamento para navegação do veículo dentro da planta. A presente monografia trata-se do desenvolvimento e implementação de um protótipo de AGV de baixo custo, com dois modos de sensoriamento para controle. O projeto tem como objetivo a caracterizar a resposta ao degrau de um sistema de controle clássico, através do sensoriamento escolhido. A metodologia consiste em: pesquisa científica sobre sistemas de controle clássico em sistemas dinâmicos de tração diferencial e modos de sensoriamento; montagem eletrônica e mecânica do protótipo; construção do ambiente de teste; programação do microcontrolador; aplicação do método de controle PI; coleta dos dados e através destes a caracterização. Os resultados obtidos são a resposta ao degrau respectiva de cada método de navegação aplicado, por sensor óptico e ultrassônico. Os resultados foram condizentes com a hipótese proposta, assim atendendo o principal objetivo que era caracterizar a resposta ao degrau do protótipo. Os dados são apresentados nos resultados e analisados, estes podem servir para futuras aplicações industriais reais.

Palavras-chaves: Sistemas de controle clássico, AVG, caracterização, resposta ao degrau.

ABSTRACT

The use of autonomously guided vehicles has become a good resource for transporting materials in manufacture, from one station to another. In addition, there are several ways of sensing for navigation of the vehicle within the plant. This monograph is about the development and implementation of a low-cost AGV prototype, with two sensing modes for control. The project aims to characterize the step response of a classic control system, through the chosen sensing. The methodology consists of: Scientific research on classical control systems in dynamic differential traction systems and sensing modes; Electronic and mechanical assembly of the prototype; Construction of the test environment; Microcontroller programming; Application of PI control methods; data collection and characterization through them. The results obtained are the response to the respective step of each applied navigation method, by optical and ultrasonic sensor. The results were consistent with the proposed hypothesis, thus meeting the main objectives that were to characterize the response to the step of the prototype. The data are presented in the results and analysis; and can be used for future real industrial applications.

Keywords: Classical control systems, AVG, characterization, response to Step.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – AVG seguidor de proximidade e de linha	17
Figura 2 – Controle PID com amplificadores operacionais analógicos.....	20
Figura 3 – Diagrama de blocos do controlador PID.....	20
Figura 4 – Sensores a serem instalados no AGV	21
Figura 5 – Ilustração do funcionamento do sensor óptico por reflexão difusa	22
Figura 6 - Ilustração da refletância através das superfícies escura e clara.	22
Figura 7 - Ilustração do sinal ultrassônico gerado no modo reflexão.....	23
Figura 8 - Equipamentos eletrônicos ponte H I298N e motor elétrico com roda acoplada.....	24
Figura 9 - Esquema eletrônico da ponte H, exemplo de um modelo.	24
Figura 10 – Forma de onda no padrão PWM	25
Figura 11– <i>Software</i> Tracker realizando o gráfico a partir de vídeo	26
Figura 12 - Protótipo de AGV executando um trajeto	27
Figura 13 - Protótipo utilizado para implementação de AGV.....	29
Figura 14 - Fluxograma do método aplicado	31
Figura 15 - Diagrama de blocos do funcionamento do AVG.....	32
Figura 16 – Diagrama elétrico do AVG proposto no trabalho	33
Figura 17 - AGV montado mecanicamente e eletronicamente	34
Figura 18 - Ambiente no modo para aplicação seguidor de linha.....	35
Figura 19 - Desenho do ambiente de teste no modo proximidade	35
Figura 20 - Diagrama de resposta ao degrau que será analisada para cada técnica de sensoriamento.....	37
Figura 21 - Fluxograma do processo de modelagem da planta real.....	39
Figura 22 - Análise dos ângulos em instantes de tempos em resposta máxima do sistema.....	40
Figura 23 - Curva de reação da planta	40
Figura 24 - Diagrama de blocos do projeto AGV em malha fechada.....	41
Figura 25 - Tabela para sintonização de constantes pelo método de Ziegler-Nichols.	42
Figura 26 - Simulação da resposta ao degrau após sintonia das constantes da planta do AVG no SCILAB	43

Figura 27 - AGV em etapa concluída de montagem mecânica e eletrônica.....	44
Figura 28 - Monitoramento <i>serial</i> do sensor ultrassônico na pista de teste.....	45
Figura 29 - Posição dos sensores na faixa de detecção.....	46
Figura 30 - Monitoramento via <i>serial</i> dos valores dos sensores ópticos.....	47
Figura 31 - Análise através de <i>software</i> para coleta de dados da resposta ao degrau nos modos de controle por sensor ultrassônico e por sensor óptico.....	48
Figura 32 - Resposta ao degrau dos sensoriamentos.....	49
Figura 33 - Curva característica do sensor óptico obtida.....	50
Figura 34 - Curva característica do sensor ultrassônico obtida.....	51
Figura 35 – Resposta ao degrau sobreposta do AGV com sensor de presença e sensor óptico.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resposta ao degrau do AGV segundo as técnicas de sensoriamento.....48

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGV	<i>Automated Guided Vehicle</i> – Veículo guiado automatizado
FMS	<i>Flexible Manufacturing Systems</i> – Sistema Flexível de Manufatura
FPS	Frames Por Segundos
IHM	<i>Interface Human Machine</i> – Interface humano-máquina
LED	<i>Light Emiteer Diode</i> – Diodo Emissor de Luz
MDF	<i>Medium Density Fiberboard</i> – Placa de média densidade
Mpp	<i>Maximum Percentage Peak</i> - Máxima ultrapassagem percentual
PI	Proporcional Integral
PD	Proporcional Derivativo
PID	Proporcional Integral Derivativo
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> - Modulação por largura de pulsos
RF	Rádio Frequência
UERGS	Universidade Estadual do Rio Grande do Sul

LISTA DE SÍMBOLOS

θ	Posição angular
K_p	ganho proporcional
K_i	ganho integral
K_d	ganho derivativo
$t(s)$	tempo em segundos
T_p	Instante de pico
T_s	Instante de subida
T_a	Instante de acomodação

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 PROBLEMÁTICA.....	15
1.2 HIPÓTESE.....	16
1.3 OBJETIVOS.....	16
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1.1 Sistema de controle proporcional	18
2.1.2 Sensores	20
2.1.2.1 Sensor óptico.....	21
2.1.2.2 Sensor ultrassônicos	22
2.1.3 Acionamento	23
2.1.4 Modulação por largura de pulso – PWM (<i>Pulse Width Modulation</i>) ..	25
2.1.5 Aplicativo de <i>software</i> Tracker	26
2.2 PESQUISAS RELACIONADAS	26
2.2.1 Veículo autoguiado (AGV – <i>Automated Guided Vehicle</i>): protótipo seguidor de linha	27
2.2.2 Construção e avaliação do desempenho de um veículo autoguiado – AGV, de baixo custo, para uso em ensino e pesquisa	28
3 METODOLOGIA	30
3.1 TIPO DE PESQUISA.....	30
3.2 UNIVERSO DE ABRANGÊNCIA DA PESQUISA	30
3.3 MÉTODO APLICADO	31
4 RESULTADOS	38
5 ANÁLISE	50
5.1 ANÁLISE DA RESPOSTA AO DEGRAU NO MODO DE NAVEGAÇÃO POR SENSOR ÓPTICO	50
5.2 ANÁLISE DA RESPOSTA AO DEGRAU NO MODO DE NAVEGAÇÃO POR SENSOR ULTRASSÔNICO.....	51
5.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS	52
5.4 ANÁLISE DO PROTOTIPO AO PERCORRER TRAJETOS DE FORMA AUTONOMA	53

6 CONCLUSÃO	
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	55

1 INTRODUÇÃO

Com o avanço das tecnologias, com cenários de mercado global cada vez mais competitivos e diante da grande busca mundial por produção a baixo custo, surgem novos meios tecnológicos a fim de otimizar os processos. Um dos métodos aplicáveis para competitividade é o Sistema Flexível de Manufatura (FMS). Um FMS pode ser definido como um grupo de equipamentos ou células de manufatura ligadas por um sistema manipulador ou movimentador de material e outros equipamentos auxiliares controlados por computador (SIMÕES; VECCHIA; SILVA, 2015).

Este avanço tecnológico que se observa, com a nova política industrial americana, que antes de tudo uma política que tem a inovação como missão, isto é, seu objetivo é aumentar o nível de tecnologia na economia para restaurar sua competitividade (ABDI, 2017)

Um dos grandes conceitos da indústria do futuro é a indústria 4.0 que de acordo com Pereira e Simoneto (2018, p.8) “Trata-se de uma revolução dos processos de manufatura, tendo por base, entre outras tecnologias, os sistemas ciber-físicos e a internet das coisas,” Diminuindo custo, tempo, e remanejando dos funcionários para funções mais críticas. Segundo Coelho:

“O impacto da indústria 4,0 vai além da simples digitalização passando por uma forma muito mais complexa de inovação baseada na combinação de múltiplas tecnologias que forçaram às as empresas a repensar a forma como gerem os seus negócios e processos, como se posicionam na cadeia de valor, como pensam-no desenvolvimento de novos produtos e os introduzem no mercado, ajustando ações de marketing e distribuição.” (COELHO, 2016. p.15).

Um dos itens dessas tecnologias que será retratado nesta monografia é o transporte por robôs, mais conhecido como transporte por veículos autônomoamente guiados (AGVs) e seus paradigmas de controle e sensoriamento. Possuem diversas aplicações e funções dentro da indústria. Conforme afirma Bortolon:

“Os veículos guiados automaticamente (AGVS) são componentes chave no ramo da intralogística. Tais sistemas são aplicados na automação de processos, onde há necessidade de movimentação de materiais dentro de indústrias, centros de distribuição e estabelecimentos comerciais.” (BORTOLON, 2018, p.12).

Ainda conforme afirma Brito, “[...]capaz de seguir rota e realizar a carga e descarga de materiais sem a necessidade de integração humana direta, oferecendo segurança e velocidade em operações contínuas programadas” (BRITO; ALMEIDA; SILVA; SANTIAGO; JÚNIOR, 2020). Assim sendo, uma ferramenta aliada a produção por sistemas flexíveis de manufatura.

Ha vários tipos de sensoriamento para controle do veículo de transporte autônomo, aqui se citam alguns comumente usados. São eles: por fita reflexiva, sensor óptico, sensor de proximidade (ultrassom), navegação por imagem (câmera), navegação por cabo guia (RF), navegação por SLAM (localização e mapeamento simultâneos) (ULLRICH, 2015). Sendo a escolha de qual melhor tipo de sensoriamento, se tornando problema para este trabalho, no qual será realizada a implementação e constatação dos mesmos e evidenciada nas seções seguintes.

1.1 PROBLEMÁTICA

Um AVG pode ter muitas rotas, dependendo da finalidade para a qual será usado. Contudo deve dispor de um circuito de sensoriamento e uma inteligência de controle (SOUZA; ROYER, 2013). Um grande dilema dos modelos de AVGs existentes é sensoriamento, pois faz total papel na eficácia do equipamento, afetando nas tomadas de decisões e robustez do equipamento. Ainda conforme afirmam Jung, Osório, Kelber e Heimen.

“Os robôs e veículos móveis devem ser dotados de atuadores, que serão os responsáveis pela execução de suas ações e, principalmente, pelo seu deslocamento no ambiente. Existem diferentes tipos de dispositivos usados na locomoção dos robôs, e conforme a solução/implementação adotada o veículo terá diferentes tipos de comportamento” (JUNG *et al.*, 2005, p. 1361).

A percepção é um dos componentes mais importantes para guiar um AVG, pois através dela é possível o referenciamento, ou seja, saber a posição atual do veículo e consecutivamente a tomada de decisões (JUNG *et al.*, 2005). Um veículo autônomo em conceito não depende de atuação humana para tomada de decisões, portanto a escolha do método de sensoriamento e escolha do modelo de controle é de suma importância (OTTONI; LAGES, 2003).

Em sistemas de transportadores autônomos são utilizadas tecnologias distintas para navegação e controle, com propósito de manter o transportador na

trajetória desejada. Mas como decidir o tipo de sensoriamento e o tipo de controle a ser usado é a grande dúvida.

O AGV é uma das tecnologias mais promissoras no transporte de materiais industriais, devido sua agilidade de movimento, eficiência e flexibilidade. Porém, há de verificar suas vantagens antes de implantar tal sistema (BRITO; ALMEIDA; SILVA; SANTIAGO; JÚNIOR, 2020).

Existem diversos métodos de controle, todavia, ainda o sistema clássico da família PID (Proporcional, Integral e Derivativo) é um dos mais simples e robustos a serem utilizados, atendendo de forma satisfatória aos problemas de controle de sistemas dinâmicos clássicos propostos (JUNG *et al.*, 2005).

1.2 HIPÓTESE

Uma caracterização de sensoriamento de sistemas de transporte, através de teste e ensaios auxilia na tomada de decisão quanto a aplicação de sistemas de transporte autônomo. A partir de testes realizados em ambiente controlado será possível coletar dados, a fim de criar resultados pertinentes para caracterização do veículo de transporte e o seu comportamento no local de trabalho. Métodos usados com diferentes tipos de sensores e modelos de controle clássico que melhor se adequam a diferentes problemas de navegação levando em consideração a pouca informação do ambiente em que o AVG irá atuar, portanto o método de navegação é de suma importância para o resultado final (OTTONI; LAGES, 2003).

Ainda conforme afirmam Jung *et al.* (2005, p. 1363), “Um sistema robótico móvel pode ter diferentes níveis de autonomia e inteligência, o que será definido pelo tipo de sistema de controle integrado ao sistema”. Ou seja, o modelo empregado para controle faz diferença no desempenho de ações que o AGV irá atuar.

1.3 OBJETIVOS

O objetivo geral do trabalho é caracterizar o comportamento de transportadores autônomos a partir de dois tipos de sensoriamento, através de sensoriamento de distância com sensor ultrassônico e sensoriamento óptico de uma

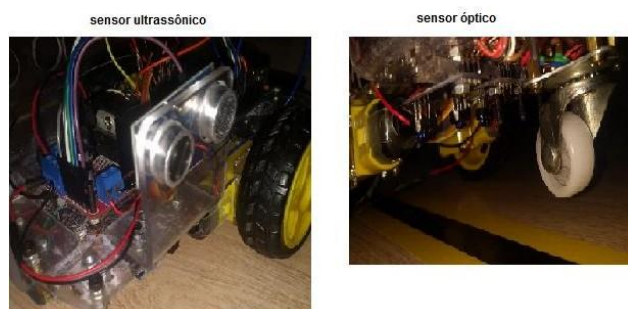
fita guia.

Para o atingimento deste objetivo geral, objetivos específicos são propostos, de forma a conduzir o trabalho e balizar seus resultados. São eles:

- a) Pesquisar tecnologias de transportadores autônomos, fazendo um estudo bibliográfico de métodos e conceitos aplicados em veículos autônomos guiados (AVG's), sobre sensoriamento e controle clássico, a partir deste tirar conclusões com suas características de navegação e controle;
- b) Modelar um protótipo funcional de baixo custo, utilizando um micro controlador (Arduino Uno RV3) com 2 tecnologias de sensoriamento (proximidade, fita guia), caracterizar o desempenho destes protótipos com suas respostas ao degrau para um controlador clássico, com uso de controlador PI.
- c) Proceder simulações computacionais da resposta ao degrau de cada sistema de controle e seu respectivo sensoriamento;
- d) Implementar o AGV com os dois sistemas de sensoriamento, monitorando sua resposta ao degrau;
- e) Divulgar os resultados alcançados em defesa da monografia desenvolvida e na edição de um artigo científico, a ser publicado.

Através da implementação em protótipo será possível chegar a conclusões sobre qual modelo de sensoriamento utilizado apresenta a melhor resposta. Será testado o modelo proporcional integral "PI" onde será analisado a resposta. Estima-se que seja o controle PI o mais adequado para analisar os comportamentos dos sensores de proximidade (ultrassom) e do sensor óptico. O sensor óptico irá atuar como seguidor de linha e o sensor de proximidade irá atuar com desvio de proximidade, em uma área definida. Conforme Figura 1 é visível a ideia proposta.

Figura 1 – AVG seguidor de proximidade e de linha.



Fonte: Autor(2021).

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A fundamentação é a base de conhecimento do estado da arte, e tem o propósito de facilitar o entendimento da proposta e resultados do trabalho aqui pesquisado. Nos fundamentos tecnológicos se propõe a apresentar as tecnologias e conceitos utilizados no trabalho. Os fundamentos de pesquisa ou pesquisas relacionadas trazem referências de trabalhos similares, métodos utilizados e resultados alcançados, a título de comparação para verificação da assertividade da proposta que este trabalho de conclusão propõe.

Para o entendimento do presente trabalho é necessário o breve conhecimento das ciências envolvidas, fundamentalmente sobre sistemas clássicos de controle, sensoriamento e acionamento, aos quais serão descritos previamente ao decorrer dos tópicos.

2.1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Aqui será descrito sucintamente e apresentada referências cruciais para entendimento e fundamento da pesquisa, esclarecendo os principais conceitos para desenvolvimento do trabalho de conclusão. Os tópicos que serão abordados, comentados e descritos nesta sessão são:

- a) Sistemas de controle proporcional integral e diferencial;
- b) Sensores;
- c) Acionamento;
- d) *Software* de análise de sistemas físicos.

2.1.1 Sistema de controle proporcional

O sistema de controle PID está contido em toda a teoria de sistemas de controle clássico. Em algumas literaturas pode ser encontrado como sistema de controle automático ou robusto. Neste tópico será explicado o funcionamento de tal modo de controle e aplicação.

A utilidade dos controles PID está na sua aplicabilidade geral à maioria dos sistemas de controle, em particular, quando o modelo matemático da planta não é

conhecido (OGATA, 2010, p.521). É interessante notar que mais da metade dos controladores industriais em uso atualmente emprega esquemas de controle PID ou PID modificado (OGATA, 2010, p.522). Uma forma de controlador utilizado amplamente em processos industriais é o controle de três termos ou controlador PID (DORF, 2001, p. 289), conforme será mostrada a função de transferência na Equação 1, onde K_p representa o ganho proporcional, K_i o ganho integral e K_d o ganho derivativo.

$$G(S) = K \frac{KI}{P} + K \frac{S}{D} \quad (1)$$

No domínio tempo temos a mesma função, representada conforme Equação 2.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int e(t) dt + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

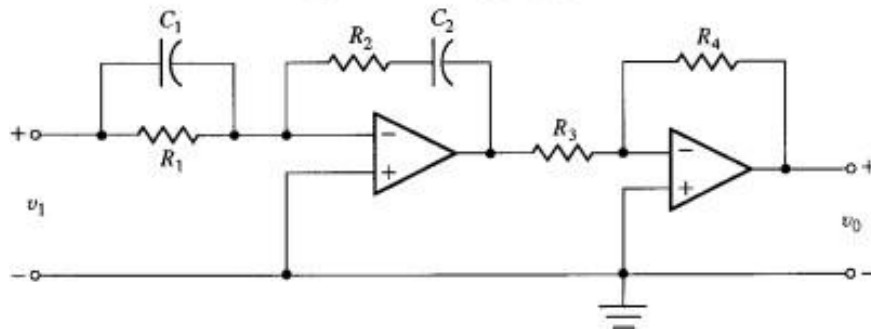
Nesta equação as variáveis e constantes são representadas como:

- a) $u(t)$ representa a variável manipulada;
- b) K_p ganho proporcional;
- c) K_i constante de integração;
- d) K_d ganho de derivação;
- e) $e(t)$ é o erro ($sp - pv$).

Conforme as Equações 1 e 2 das respectivas funções de transferências, é possível modificar o tipo de controle. Para se ter um controle tipo P, os parâmetros K_i e K_d são nulos, para um controle PI, o parâmetro K_d igual a zero, enfim é possível mais habilitações de controle, entretanto as mais comumente usadas são P e PI, conforme consta em Dorf e Bishop (2001). Este tipo de controle apesar de já não ser novidade é bastante atraente, pois introduz uma função de transferência com um pólo na origem e dois zeros que podem ser posicionados em qualquer lugar do semiplano S da esquerda (DORF; BISHOP, 2001), ou seja, prevê que seja possível estabilizar um sistema instável.

O diagrama eletrônico mostrado abaixo na Figura 2 fornece uma ideia analógica de um controlador PID, que inicialmente era utilizado desta forma em sistemas de controle de áudio, mas que atualmente é utilizado em controladores. Na figura da direita para esquerda se tem os parâmetros K_p , K_i e K_d , respectivamente. Onde, K_p atua sobre o ganho, K_i atua sobre o erro não nulo e K_d corrige interferências com frequências altas.

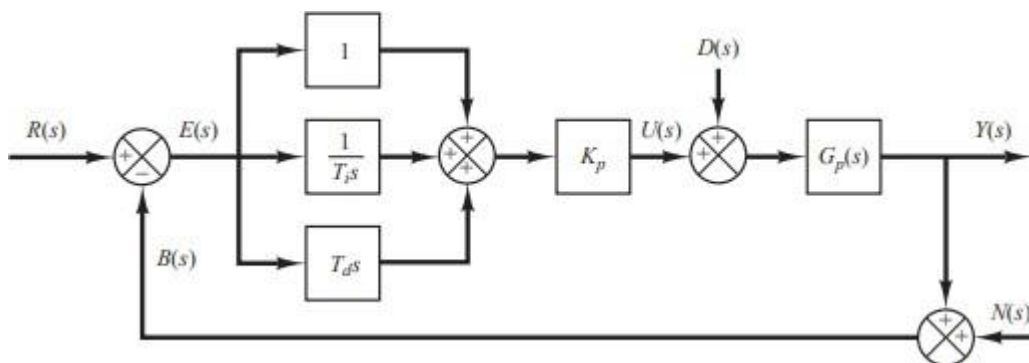
Figura 2 – Controle PID com amplificadores operacionais analógicos.



Fonte: Dorf e Bishop (2001).

Conforme Figura 3 é possível a visualização do diagrama de blocos do controlador PID padrão, onde se tem o modo P, i, D somados, para utilização do PI se anula o modo D, aplicando a entrada o valor zero.

Figura 3 – Diagrama de blocos do controlador PID.



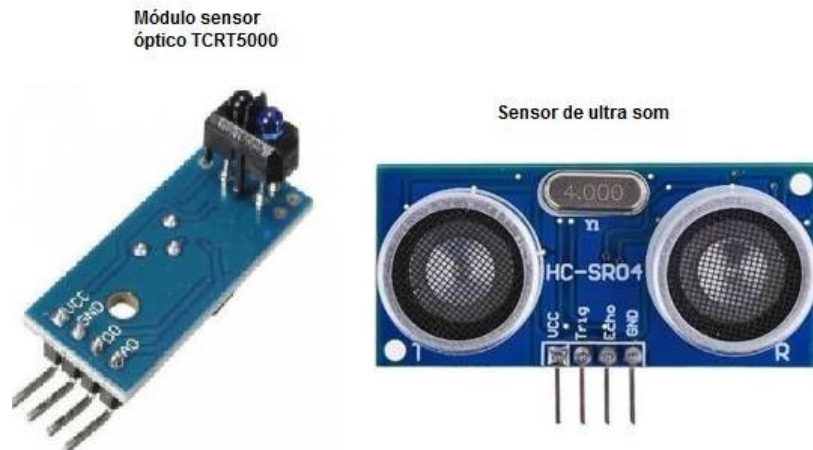
Fonte: Ogata (2010).

2.1.2 Sensores

Neste tópico e em suas subseções serão explicados os conceitos de funcionamento dos sensores utilizados e a tecnologia por trás dos mesmos. Para a construção do veículo autônomo guiado automaticamente foram utilizados sensores de ultrassom (modelo HC-SR04), para cobrir a área lateral do veículo, e cinco módulos de sensores ópticos (modelo TCRT5000) os quais serão responsáveis pela orientação do veículo. O método de sensoriamento será escolhido para o devido

teste, a ser caracterizado. Conforme Figura 4 é possível ver os dois tipos de sensores que serão montados no robô.

Figura 4 – Sensores a serem instalados no AGV.



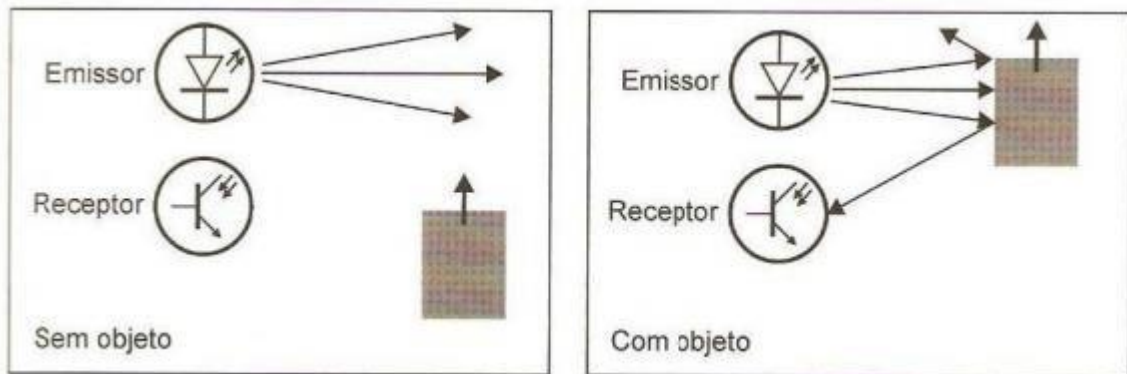
Fonte: Autor(2021).

2.1.2.1 Sensor óptico

O sensor óptico e a tecnologia por trás de seu funcionamento consistem em ser componentes eletrônicos de sinalização e comando, que executam detecção de qualquer material sem que haja contato mecânico entre eles (THOMAZINI; ALBUQUERQUE, 2011). O princípio de funcionamento do sensor óptico baseia-se na existência de um emissor e um receptor. A luz gerada pelo emissor deve atingir o receptor com intensidade suficiente para fazer que o sensor comute sua saída. O emissor é um LED infravermelho e o receptor um fototransistor.

Sensores ópticos difusos possuem como característica principal o fato de o emissor e o receptor de luz estar no mesmo componente, dispensando o uso de outro componente com característica receptora ou de reflexão. Ainda conforme Thomazini e Albuquerque (2011), a luz enviada pelo emissor cria uma região ativa cuja presença de um objeto faz com que a luz seja refletida de forma difusa, de volta ao receptor, ativando o sensor. A partir da Figura 5 é possível se ter noção do funcionamento por reflexão difusa.

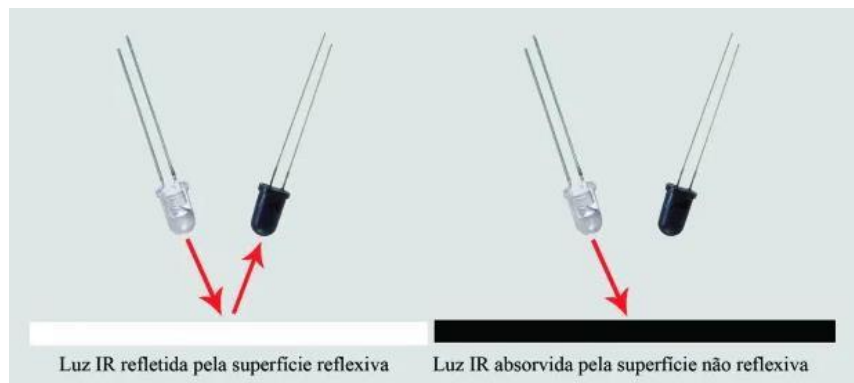
Figura 5 – Ilustração do funcionamento do sensor óptico por reflexão difusa.



Fonte: Thomazini e Albuquerque (2011).

Ainda é importante lembrar que no modo seguidor de linha o sensoriamento no modo óptico reflexivo irá atuar em sobre uma superfície pouco reflexiva (escura) e uma superfície reflexiva (branca ou clara), assim com diferentes superfícies a refletância do sinal é modificada, como possível ver na ilustração da Figura 6.

Figura 6 - Ilustração da refletância através das superfícies escura e clara.



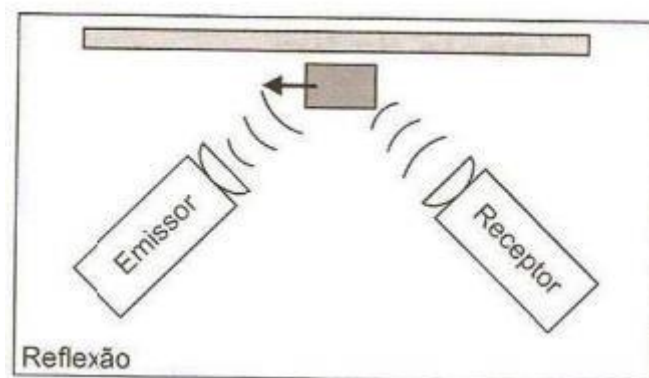
Fonte: SQUIDS (2020).

2.1.2.2 Sensores ultrassônicos

Os sensores ultrassônicos são caracterizados pelo seu alto desempenho, confiabilidade e versatilidade. Eles exercem as tarefas mais complexas de uma aplicação, envolvendo detecção de objetos ou medição de nível com precisão milimétrica. Ainda conforme Thomazini e Albuquerque (2011), sinais ultrassônicos são como ondas de som audíveis, porém com frequências muito mais altas. Os

transdutores ultrassônicos têm cristais piezelétricos que ressonam a uma frequência desejada e convertem energia elétrica em energia acústica e vice-versa. As ondas sonoras são transmitidas e refletidas na forma de um cone de um objeto para o transdutor. Um sinal de saída do transdutor é produzido para executar algum tipo de indicação ou controlar uma função. Conforme ilustra a Figura 7, é possível se observar o formato de cone gerado e seu respectivo emissor e receptor.

Figura 7 - Ilustração do sinal ultrassônico gerado no modo reflexão.



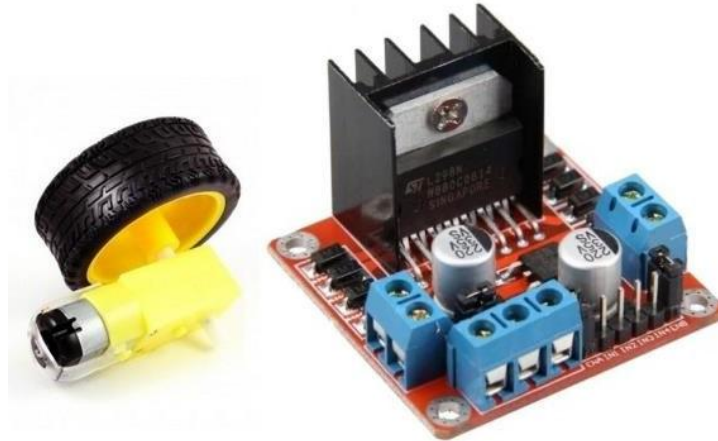
Fonte: Thomazini e Albuquerque (2011).

Para se medir distância com esse tipo de sensor é emitido um sinal ultrassônico dele e medido o tempo que leva para voltar para o receptor, sendo calculado a distância a partir deste tempo medido.

2.1.3 Acionamento

A ponte H é essencial no funcionamento, pois através do controle em PWM (*Pulse Width Modulation* - Modulação por largura de pulsos) gerado através de uma saída digital do micro controlador Arduino, que será controlado pelo sistema em malha fechada, fará o direcionamento do veículo, através da tração diferencial dos motores traseiros do mesmo. A Figura 8 representa motor e ponte H.

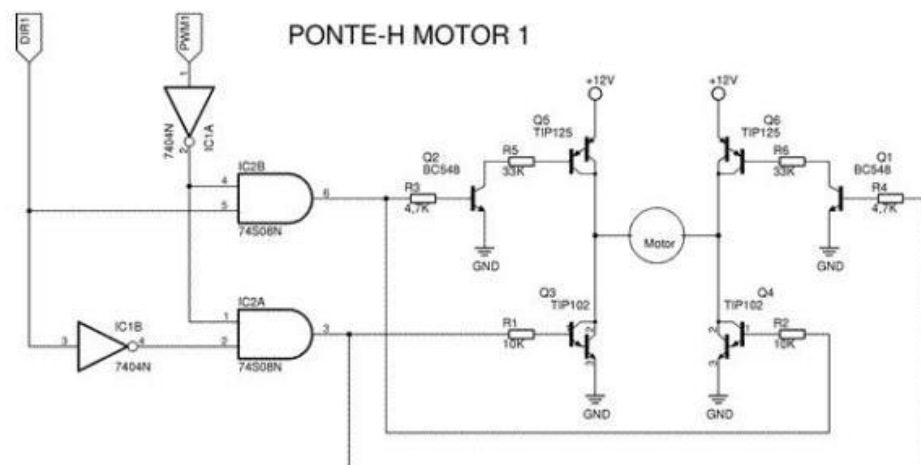
Figura 8 - Equipamentos eletrônicos ponte H I298N e motor elétrico com roda acoplada.



Fonte: Autor(2021).

A ponte H internamente tem um circuito eletrônico com a finalidade de direcionar a rotação de um motor, através de chaves de comutações internas e lógicas digitais (BRITE; SANTOS, 2018). O nome ponte H é dado pela forma que assume o circuito quando montado, a forma com que o motor irá operar dependerá do que se deseja controlar. Há casos em que o torque é mais importante, outros a precisão ou a velocidade. Conforme a ilustração na Figura 9 que mostra o diagrama eletrônico da ponte H é possível se ter noção do funcionamento.

Figura 9 - Esquema eletrônico da ponte H, exemplo de um modelo.



Fonte: Brites e Santos (2008).

2.1.4 Modulação por largura de pulso – PWM (*Pulse Width Modulation*)

Para utilização do controle de velocidade na tração diferencial que direcionará o veículo automaticamente é imprescindível entender o controle por modulação por largura de pulso (PWM), pois este estará ligado diretamente com o sinal de resposta do controle de malha automática realimentada do método de controle clássico PID.

O controle PWM é o responsável por todas as ações do acionamento na ponte H, que por sua vez fará o acionamento dos motores. O controle por largura de pulso consiste em sua mais simples analogia em um tempo ligado e um tempo desligado, formando assim uma onda quadrada, conforme afirma Feroldi (2011). A modulação PWM baseia-se na variação da largura dos pulsos, que são gerados através da comparação de um sinal analógico com um sinal de referência, geralmente uma onda triangular ou dente-de-serra.

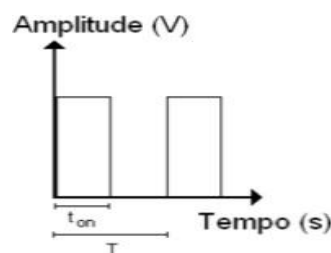
É possível afirmar que a largura de pulso é realizada variando-se o tempo em que o pulso permanece em nível alto. A relação entre o tempo em que o pulso está em nível lógico alto e o período total do pulso é chamada de razão cíclica D (FEROLDI, 2011). Conforme ilustrado na Equação 3 a razão cíclica, onde $t(on)$ representa nível lógico alto e T o período total do ciclo.

$$D = t(on) / T$$

(3)

Ainda é possível complementar equação com a forma de onda gerada pela modulação PWM, que tem somente dois estados: um nível alto e um nível baixo. Assim, as chaves disparadas por esta forma de onda comutarão apenas entre esses dois estados (FEROLDI, 2011). A Figura 10 apresenta o gráfico de uma forma de onda no padrão PWM.

Figura 10 – Forma de onda no padrão PWM.

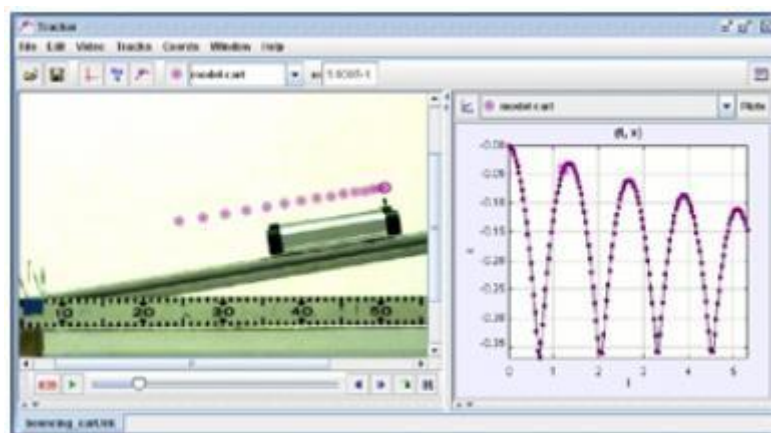


Fonte: Feroldi (2011).

2.1.5 Aplicativo de *software* Tracker

O *software* utilizado para coleta e análise de dados recomendado é o Tracker, pois apresenta um fácil entendimento, apresenta resultados gráficos intuitivos. Assim, podendo ser tiradas conclusões e resultados com poucas análises ao longo do tempo, visto que trata-se de um trabalho de cunho qualitativo. Tracker é uma ferramenta gratuita de modelagem e análise de vídeo, construída na estrutura *Java Open Source Physics* (OSP). Ele é projetado para ser usado no ensino de física (PHYSLETS, 2020). Na Figura 11 é possível ver um exemplo de simulação de modelagem.

Figura 11– *Software* Tracker realizando o gráfico a partir de vídeo.



Fonte: Physlets(2020).

O *software* fará a análise da curva de reação para obtenção das constantes da planta, modelagem e curva de amortecimento na situação de 45°, para tal será medido frames por segundo (FPS) do vídeo, onde será possível demarcar a variação da posição angular, obtendo a posição angular a cada quadro, usando os recursos do *software* para obtenção dos dados.

2.2 PESQUISAS RELACIONADAS

Nesta sessão serão relatadas pesquisas que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho. Almeida (2016) e Dreger (2001) realizaram trabalhos semelhantes, que abordam assuntos críticos de sistemas de navegação e

controles de veículos guiados automaticamente, que contribuíram em vários aspectos para esta monografia.

2.2.1 Veículo autoguiado (AGV – *Automated Guided Vehicle*): protótipo seguidor de linha

O trabalho veículo auto guiado (AGV – *Automated Guided Vehicle*) - protótipo seguidor de linha de Almeida (2016), propõe o desenvolvimento de um protótipo de veículo autônomo guiado capaz de seguir uma faixa preta colocada sobre uma superfície branca, o mais rápido possível com um ótimo desempenho. O veículo é montado sobre um kit didático e possui dois motores de corrente contínua que são os responsáveis pelo posicionamento e controlados por um microcontrolador, que recebe informações de sensores infravermelho. São desenvolvidos e implementados quatro tipos de controle, a fim de que a tarefa seja efetuada com sucesso, atendendo aos critérios de desempenho. A Figura 12 apresenta o protótipo implementado.

Figura 12 - Protótipo de AGV executando um trajeto.



Fonte: Almeida (2016).

Os métodos de controle abordados são: controle a partir de regras, controle proporcional, controle baseado em Lógica Fuzzy e controle proporcional, que tem erro gerado por meio de Lógica Fuzzy. O trabalho consiste em uma metodologia atrativa, pois de fácil entendimento e bem estruturada, podendo ser replicada facilmente e se abstrair aspectos de controle e logicas para outros métodos de sensoriamento.

Como resultado o autor explica a lógica de controle utilizada para melhor desempenho do AGV, comenta sobre a aplicação dos métodos de controle utilizados no controlador, que de acordo com Almeida (2016), foi utilizado o método de controle proporcional, devido à dificuldade de modelagem da planta. Faz comparações de tempos e resultados dos quatro métodos aplicados, retirando conclusões de cada simulação.

2.2.2 Construção e avaliação do desempenho de um veículo autoguiado – AGV, de baixo custo, para uso em ensino e pesquisa.

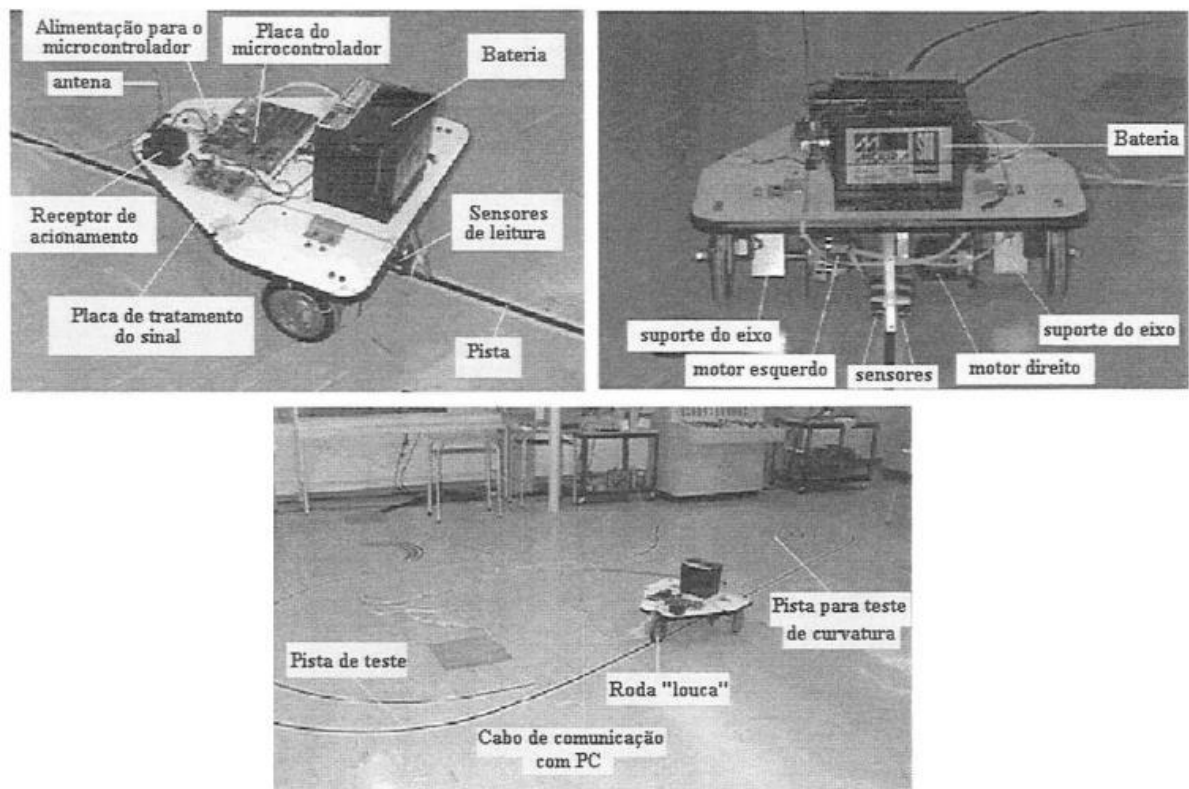
A dissertação Construção e avaliação do desempenho de um veículo autoguiado – AGV, de baixo custo, para uso em ensino e pesquisa consiste em, mostrar como se pode construir um Veículo Autoguiado (AGV) de baixo custo, montado sobre uma plataforma móvel, se utilizando de métodos de controle e entre eles o controle clássico P e PD, tracionada por dois motores de corrente contínua e propõe uma metodologia para avaliação de seu desempenho. O AGV construído é um protótipo didático que pode ser empregado no ensino de graduação, pós-graduação e pesquisa, permitindo abordagem de conceitos básicos nas áreas de instrumentação, eletroeletrônica e controle (DREGGER,2001). O autor faz excelente abordagem sobre diversos assuntos para uma construção de veículos autônomos que podem ser base para qualquer trabalho, alguns deste são:

- a) Projeto mecânico e elétrico;
- b) Transdutores para monitoração da trajetória (TMT);
- c) Técnicas de controle;
- d) Controle em malha aberta e malha fechada;
- e) Controladores analógicos e digitais;

- f) Ações básicas de controle;
- g) O controlador PID;
- h) Experimentos individuais realizados;
- i) Resultados individuais;
- j) Desempenho em curvaturas;
- k) Reação do controle em função do sistema utilizado.

Além de abordado os assuntos de controle, é realizado a implementação. Conforme a Figura 13 é possível observar o protótipo desenvolvido.

Figura 13 - Protótipo utilizado para implementação de AGV.



Fonte: Dreger (2001).

Quando trabalho citado foi experimentado, foram realizados testes e coletados resultados de controle e sensoriamento. Conforme as conclusões do autor, houveram diversas perturbações no modelo de veículo. Um deles sendo o protótipo muito pesado, devido a parte mecânica de movimentação, sendo assim uma perturbação na planta.

3 METODOLOGIA

O presente trabalho trata-se da caracterização do comportamento do sistema de controle clássico de um veículo autônomo guiado nas configurações P e PI, através do sensoriamento de proximidade (ultrassom) e por fita guia (óptico). Para tal será construído um protótipo de um AVG, será utilizado um microcontrolador Arduino como controlador.

O Protótipo será testado em ambiente controlado onde serão aplicados os modos, seguidor de linha, através de uma fita de largura 18mm aplicada ao longo de um percurso no chão e sensor de proximidade onde será construído um circuito em placas de MDF (*Medium Density Fiberboard* - placa de fibra de média densidade), aplicando os dois métodos de controle e os dois tipos de sensoriamento, onde serão coletados dados (através do aplicativo de *software* Tracker) da resposta ao degrau, em ambos casos.

3.1 TIPO DE PESQUISA

O tipo de pesquisa empregado neste trabalho foi de modo qualitativo, pois visa compreender o comportamento do AVG ao longo de testes aplicados e caracterizar seus resultados. É também de caráter descritivo, pois será realizado a coleta de fundamentos e resultados e mostrado como resultados obtidos, através da implementação e realização de testes em ambiente controlado, para constatação e coleta de dados. Por fim, é de cunho científico, visto que será coletado informações para caracterização dos sensores ao modelo de controle aplicado.

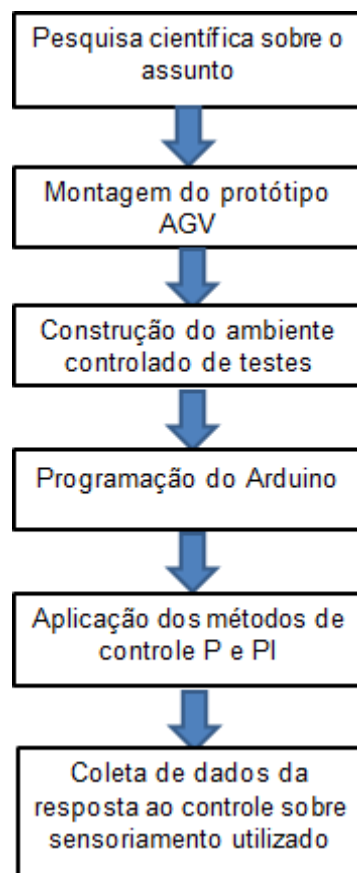
3.2 UNIVERSO DE ABRANGÊNCIA DA PESQUISA

O âmbito da pesquisa desse trabalho passa-se no universo industrial, uma vez que visa a melhor compreensão para escolha e aplicação de uma ferramenta de transporte de cargas, que mudará o dinamismo de como a indústria trabalha atualmente, visto que visa a melhor escolha como objetivo de flexibilidade dos sistemas atuais de manufatura e otimização dos processos, também sendo um dos itens fundamentais na indústria do futuro (Indústria 4.0).

3.3 MÉTODO APLICADO

O método que será aplicado consiste em etapas as quais são descritas a seguir. A primeira etapa se baseia no estudo de trabalhos já realizados e aplicados ao assunto de sensoriamento e controle de veículos autônomos. Posteriormente, se faz a construção e montagem do protótipo e sua eletrônica embarcada, com base nos trabalhos pesquisados com uso de sensores ópticos e ultrassom. A próxima etapa é a construção dos ambientes de trabalho e, subsequentemente será realizada a programação do controlador Arduino com sua escolha de sensor e respectiva programação da malha de controle P ou PI. Por fim sendo coletado informações sobre o teste feito através de *software* para geração de resultados de comportamento real. Isto demonstrado no fluxograma da Figura 14.

Figura 14 - Fluxograma do método aplicado.



Fonte: Autor(2021).

Será realizada a produção do protótipo de um AVG, que será montado sobre um chassi de acrílico, onde será montado em conjunto com sua eletrônica embarcada necessária, contendo os sensores fundamentais para as técnicas de posicionamento do trajeto e sua respectiva característica.

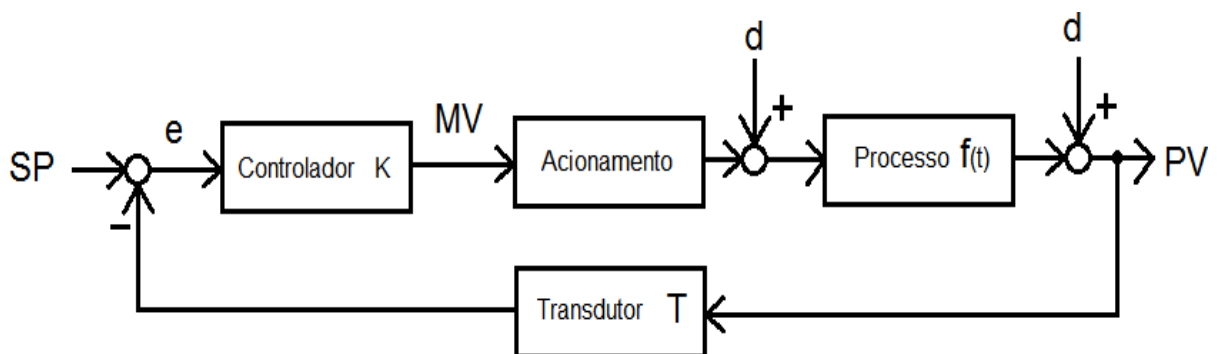
O funcionamento preverá que cada aplicação de controle poderá optar pelo método de sensoriamento que será utilizado, através de uma seleção por botões visíveis em uma IHM (*Interface Human Machine* – Interface humano-máquina) e através da leitura digital das portas do microcontrolador, que alterara lógica de aplicação no programa.

Serão instalados no chassi do AGV: sensores ópticos, ultrassom, IHM, o microcontrolador (Arduino), fonte de alimentação (5 pilhas recarregáveis de 1,2V), dois motores com rodas e redução mecânica específica para aplicação (rodas de kit de aprendizagem para protótipo de AGV), uma ponte H (I298N) para controle dos motores, matriz de contatos para facilitar as conexões e montagem dos circuitos eletrônicos.

Foi definido que a orientação do veículo será guiada pela atuação dos dois motores traseiros tendo apenas uma roda “bamba” na sua parte dianteira (roda de rodízio de rolamento de apoio axial de 20mm), servindo unicamente como apoio e movimentação para o AGV. Este é criado visando o universo fabril, pois suas características são muito comum aos AVG’s comerciais já existentes, sendo dinâmico para um estudo de caso.

Conforme Figura 15 é demonstrado um diagrama de blocos do funcionamento do veículo com seus respectivos sensores.

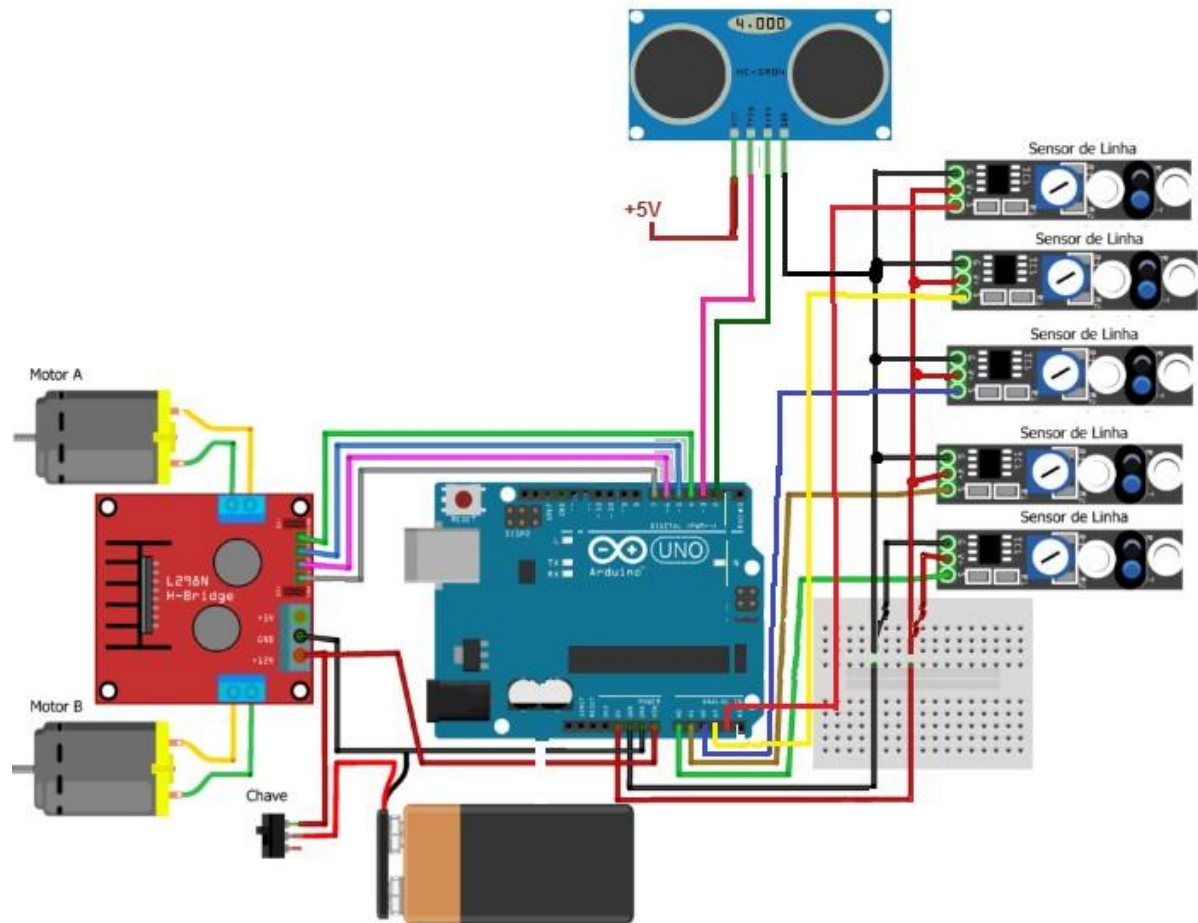
Figura 15 - Diagrama de blocos do funcionamento do AVG.



Fonte: Autor(2021).

A montagem eletrônica exige muito cuidado, pois é essencial para o bom funcionamento. Conforme Figura 16 é possível observar o diagrama elétrico do veículo.

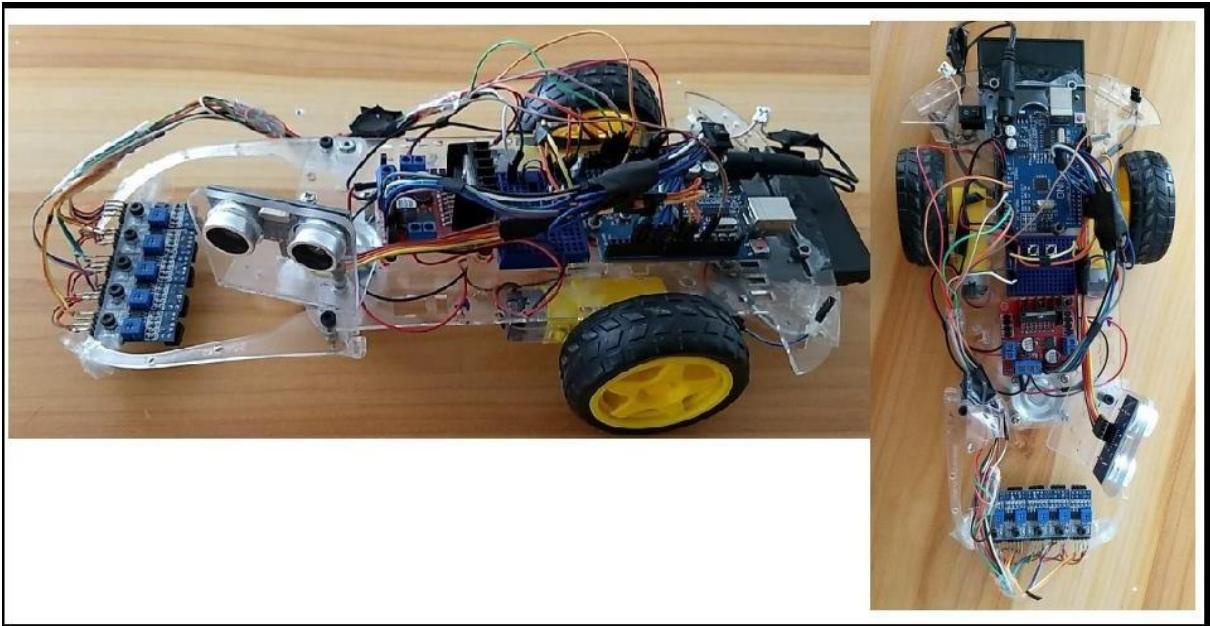
Figura 16 – Diagrama elétrico do AVG proposto no trabalho.



Fonte: Autor(2021).

A Figura 17 representa o AVG com sua montagem final, ou seja, seus devidos periféricos e demais sensores já com os circuitos eletrônicos montados. E também com toda parte mecânica já adaptada, montada e ajustada para a realização de testes.

Figura 17 - AGV montado mecanicamente e eletronicamente.

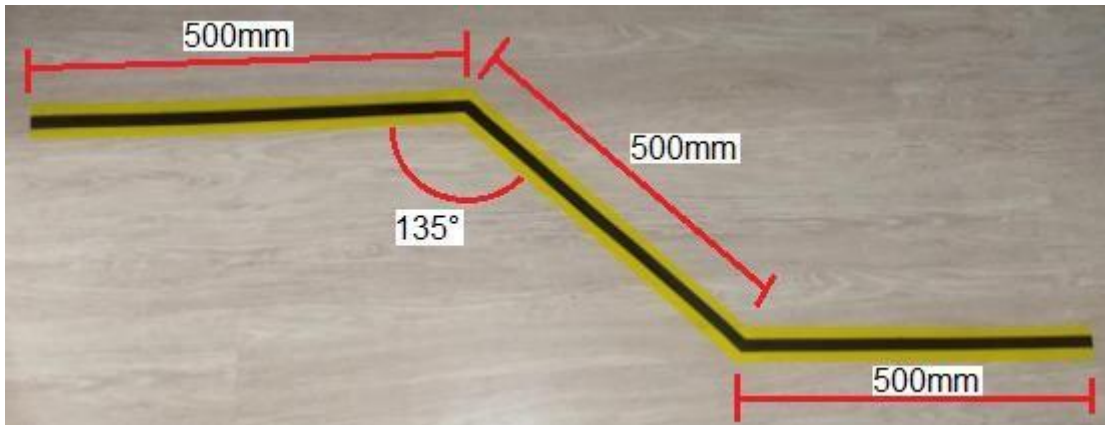


Fonte: Autor(2021).

Para implementação da eletrônica necessária para locomoção e funcionamento são necessários dois motores de 3,6 V com conjunto de redução e roda montada de 68mm e uma placa ponte H, para controle dos mesmos.

A construção da pista, como ambiente controlado é uma das etapas mais importantes, pois tem a finalidade de simular um ambiente fabril, propósito do trabalho, onde serão simulados um seguidor de linha e proximidade. O seguidor de linha consistirá em uma fita preta de largura 18mm, demarcada no chão, constituindo o circuito para o AVG. Nas laterais com fita de demarcação amarela de 48mm de largura, simulando a área não demarcada de rota, ou seja, a fita amarela é escolhida pois apresenta uma melhor reflexibilidade para os sensores e a preta menos reflexiva. Conforme Figura 18, é possível ter uma noção do exemplo da pista para seguidor no modo de seguidor de linha, onde cada curva da pista possui um ângulo com curvatura igual a 135° e comprimento de 1500mm, com intuito de fazer o degrau máximo de controle do AVG.

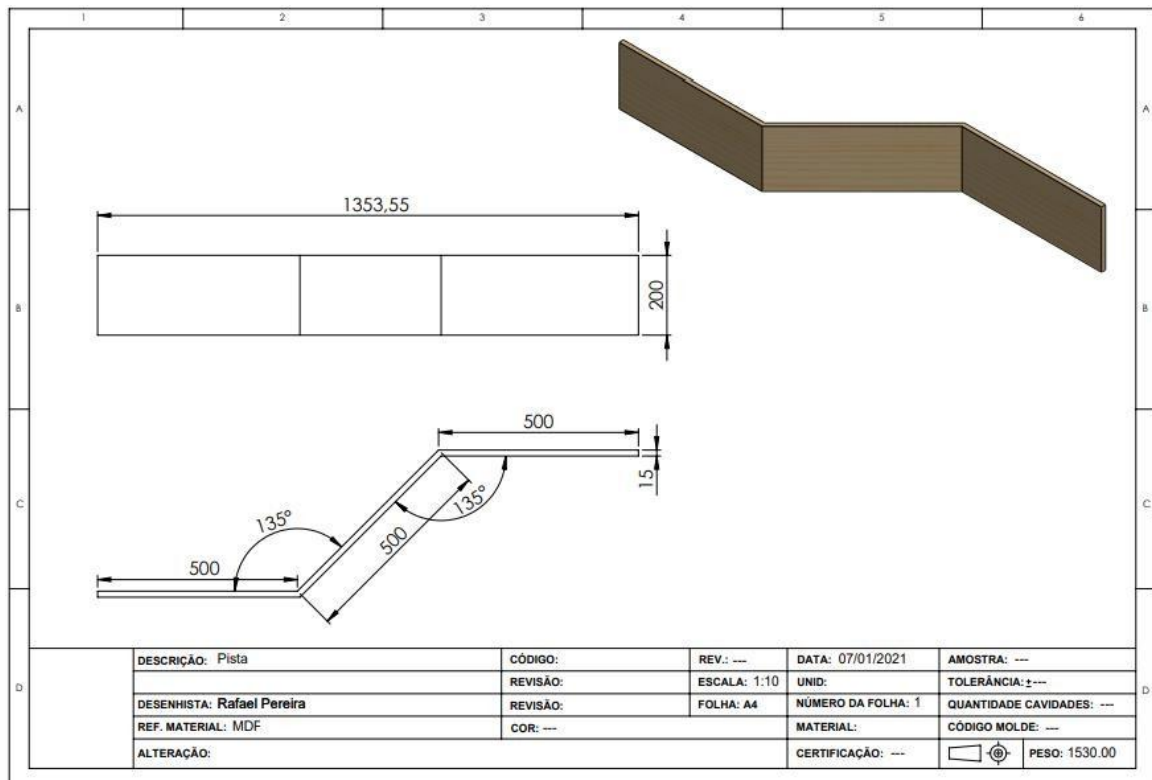
Figura 18 - Ambiente no modo para aplicação seguidor de linha.



Fonte: Autor(2021).

A pista no modo de proximidade consistirá na montagem de um circuito com 3 placas em MDF com 200mm de altura, 15mm de espessura e o comprimento de 500mm. A maior importância desta montagem é manter o circuito equidistante para não afetar no modo de controle e sensoriamento de proximidade, conforme mostra a Figura 19, o ambiente de trabalho para modo de proximidade.

Figura 19 - Desenho do ambiente de teste no modo proximidade.



Fonte: Autor(2021).

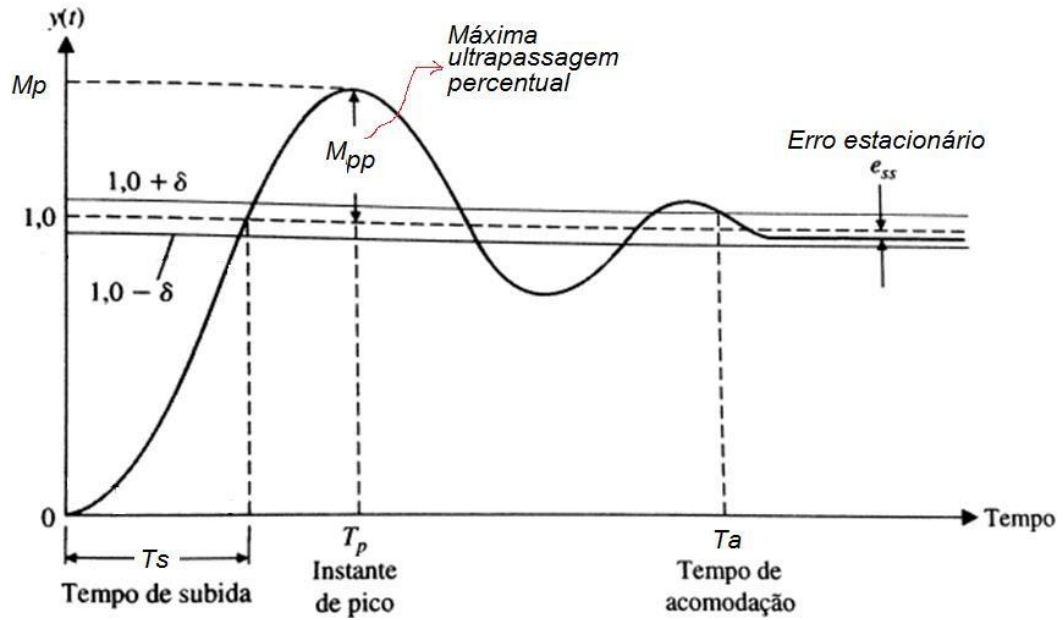
A programação do Arduino seguirá um sistema clássico de controle em malha fechada, utilizando técnicas de programação já existentes para o mesmo. A programação do sistema de controle do AVG no modo PI trabalha com o erro medido através dos sensores que ali estiverem (óptico ou proximidade). Isto significa que será configurado um ponto de referência no trajeto, que através do sistema em malha fechada será constatado o erro, e posteriormente corrigido. A programação será realizada em linguagem própria do microcontrolador (linguagem C++).

O sistema de controle clássico utilizado P (proporcional) e o sistema de controle PI (proporcional - integral), foram escolhidos pelo fato de serem bem práticos e de melhor entendimento. E também serem um dos mais utilizados na indústria.

O método aplicado em malha fechada prevê uma boa atuação como sistema de controle e resposta. O *software* utilizado para coleta e análise de dados escolhido foi aplicativo Tracker, pois apresenta um fácil entendimento e é muito utilizado para modelagem e plotagem de gráficos. Através deste será possível obter a curva de reação e identificar o ponto de inflexão para assim modelar a planta, podendo colocá-la em um simulador ou outro meio que represente a planta sofrendo as ações de controle.

Como resultados esperados, será analisado a resposta ao degrau em cada um dos sistemas AGV, segundo sua técnica de sensoriamento. Nesta análise se busca a comparação dos parâmetros em cada uma das técnicas. A Figura 20 mostra o gráfico de resposta ao degrau desejado para cada técnica de sensoriamento proposta.

Figura 20 - Diagrama de resposta ao degrau que será analisada para cada técnica de sensoriamento.



Fonte: adaptado de Dorf e Bishop(2001).

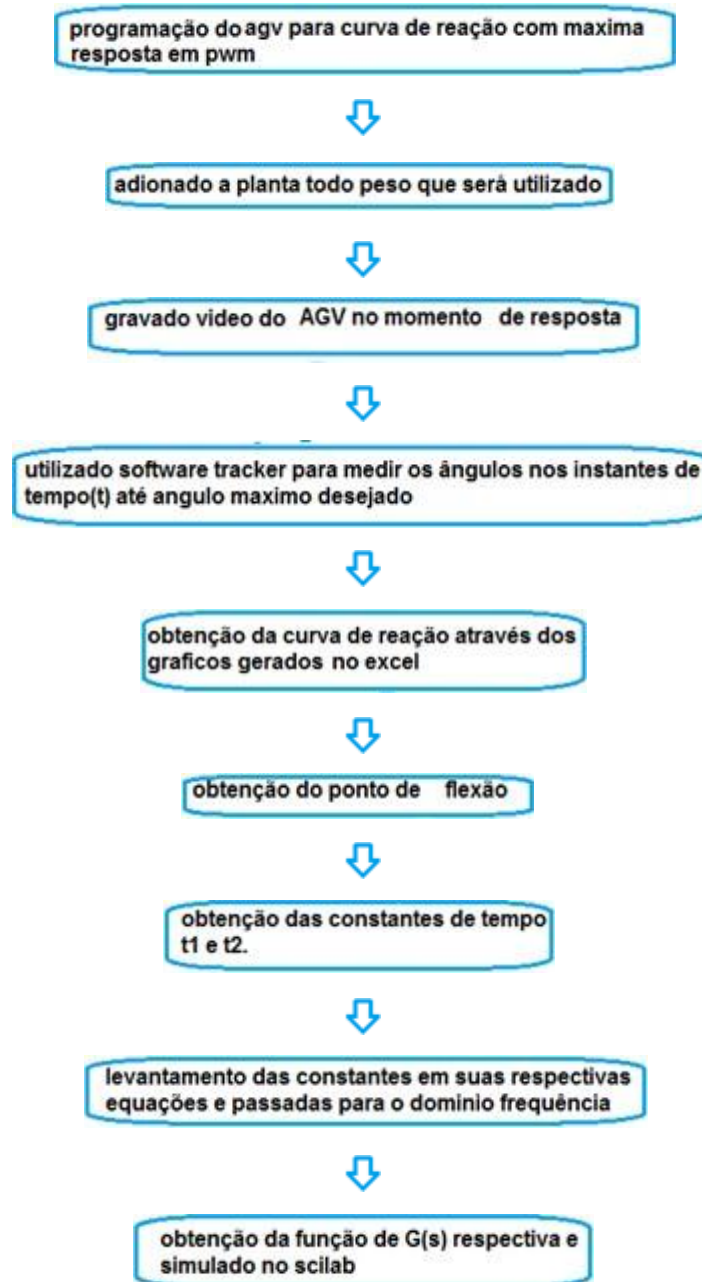
4 RESULTADOS

A modelagem das constantes do AVG em uma planta real consiste primeiramente em obter a curva de reação para definição das constantes de tempo, para um ângulo de 45° (ângulo de atuação máxima). Então, é aplicado um $u(t)$ máximo, ou seja, um PWM máximo de controle, aplicado em um dos motores para que a posição angular vá a 45° , com resposta máxima em menor tempo possível.

Para obter tal fato é realizado uma filmagem do AVG registrando a resposta máxima de controle, após é utilizado o *software* **TRACKER** como ferramenta para medição frame a frame do vídeo. Se o obtidos ângulos por frame e respectivos tempos, gerando assim valores de eixo x e y, ângulo máximo e tempos. Assim, é gerado um gráfico para obtenção da curva esperada, curva de reação, onde se pode obter o ponto de inflexão desta curva, ou seja o ponto de maior derivada.

Ao tangenciar este ângulo é possível retirar os dois tempos desejados t_1 e t_2 , tempos de resposta da curva de reação, visto que o sistema é de segunda ordem, serão utilizados nas constantes da planta. A seguir é demonstrado em um fluxograma do sequenciamento utilizado para obtenção das constantes e modelagem das mesmas em uma planta real, conforme é ilustrado na Figura 21.

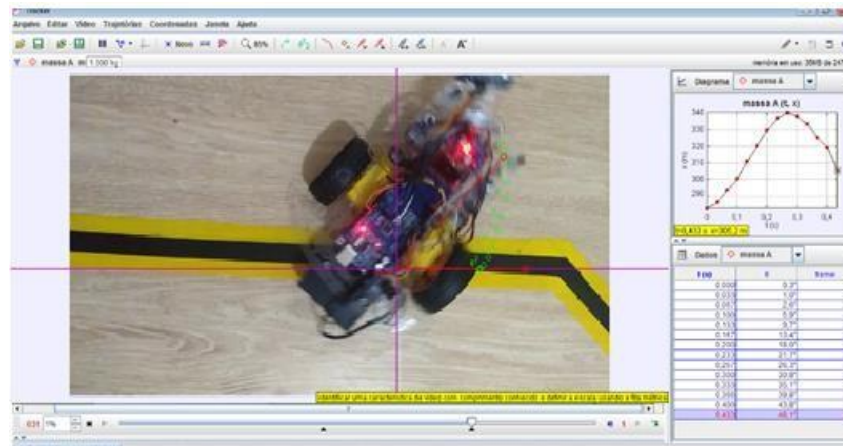
Figura 21 - Fluxograma do processo de modelagem da planta real.



Fonte: Autor(2021).

O *software* tracker foi utilizado como ferramenta de medição dos ângulos em instantes de tempo, porém o *software* possui muitos recursos físicos. Através do vídeo gravado foi possível realizar as análises, é possível uma melhor compreensão, conforme ilustra a Figura 22.

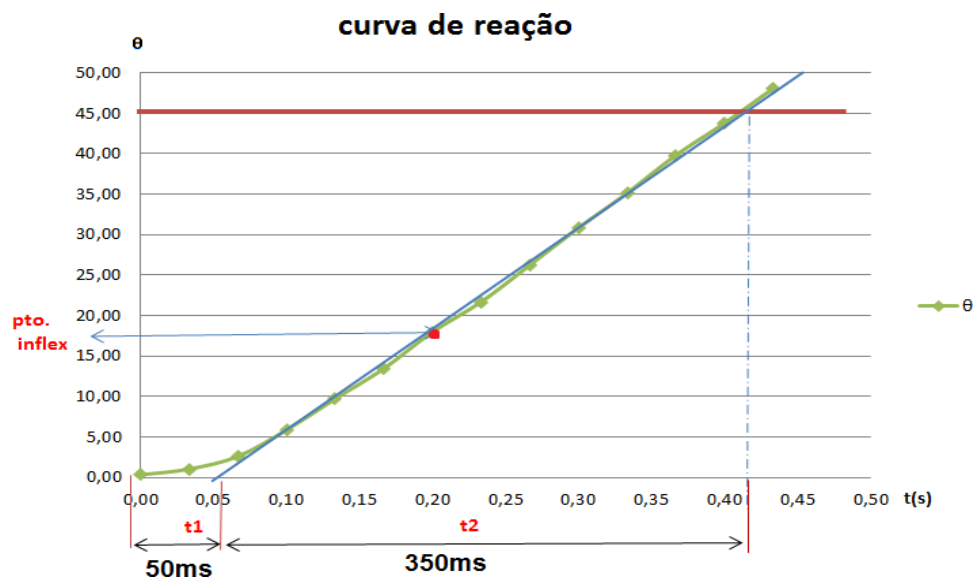
Figura 22 - Análise dos ângulos em instantes de tempos em resposta máxima do sistema.



Fonte: Autor(2021).

Através dos dados gerados foi possível fazer análise e gerar a curva de reação de Ziegler-Nichols. Para este, foi utilizado o *software* Excel. Através deste é possível a obtenção do ponto de inflexão, tangenciado pela reta para obtenção dos tempos de retardo e constante de tempo T. Conforme ilustra a Figura 23 é possível a visualização da curva de reação já com as respectivas constantes t_1 e t_2 .

Figura 23 - Curva de reação da planta.



Fonte: Autor(2021).

A partir do levantamento de constantes e equações já conhecidas, no domínio tempo, é levantado todas as constantes pertinentes ao AVG de tração diferencial, cujo sistema de controle é pertinente no controle da posição angular, composto de uma estrutura de tração.

O sistema de direção possui tração diferencial, que de fato gera torque sobre o eixo da estrutura. Após o levantamento das respectivas equações diferenciais no domínio tempo é então passado para o domínio frequência e então aplicado as constantes de tempo t_1 e t_2 , visto que o sistema apresenta ser de segunda ordem, chega-se então ao resultado da função de transferência $G(s)$ da planta, conforme é demonstrado na equação (3).

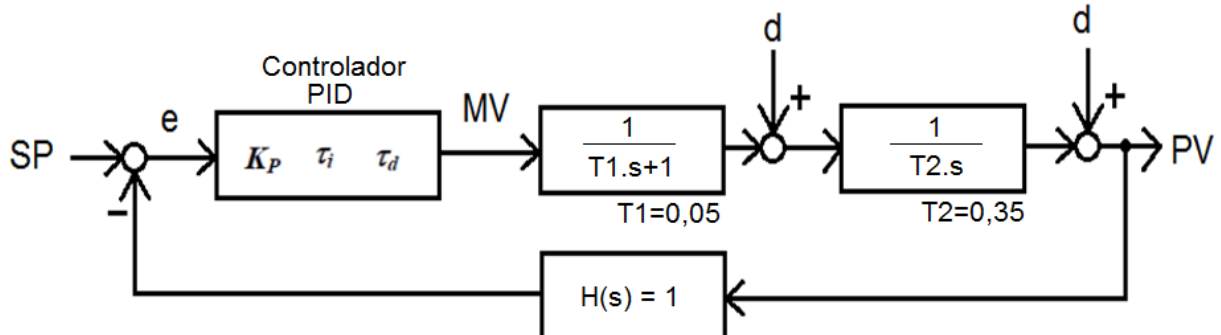
$$G(S) = \frac{V}{(T_1.S+1)} \cdot \frac{1}{T_2.S} = G(S) = \frac{V}{(T_1.T_2.S^2+T_2.S)} \quad (3)$$

Aplicando as constantes t_1 e t_2 obtidas pela análise do gráfico da curva de reação, levando em consideração o ponto de maior derivada (inflexão), onde a reta tangente deste ponto é precisa para obtenção das constantes, aplica-se na função de transferência da planta, conforme Equação (4).

$$G(s) = \frac{1}{(T_1.S+1)} \cdot \frac{1}{T_2.S} \therefore G(S) = \frac{1}{(0,05.S+1)} \cdot \frac{1}{0,350.S} \quad (4)$$

Desta forma, a planta final, em malha fechada, resulta no modelo apresentado na Figura 24.

Figura 24 - Diagrama de blocos do projeto AGV em malha fechada.



Fonte: Autor(2021).

Visto que a planta não apresenta pólos complexos conjugados dominantes pela resposta gerada em curva ao degrau tipo S, para sintonização das constantes de controle que atendam ao sistema em sua resposta respectiva máxima, é usado o método da curva de reação de Ziegler-Nichols para sintonização das constantes k_p , k_i e k_d , visto que o sistema é naturalmente estável e os distúrbios são praticamente nulos não serão considerados. Conforme a tabela para cálculo demonstrada na Figura 25.

Figura 25 - Tabela para sintonização de constantes pelo método de Ziegler-Nichols.

Tipo de Controlador	K_P	τ_i	τ_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0,9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0,3}$	0
PID	$1,2 \frac{T}{L}$	$2L$	$\frac{L}{2}$

Fonte: Ogata(2010).

Aplicasse então as equações (5) e (6), para cálculo das constantes k_p e τ_i , visto que o sistema é de segunda ordem.

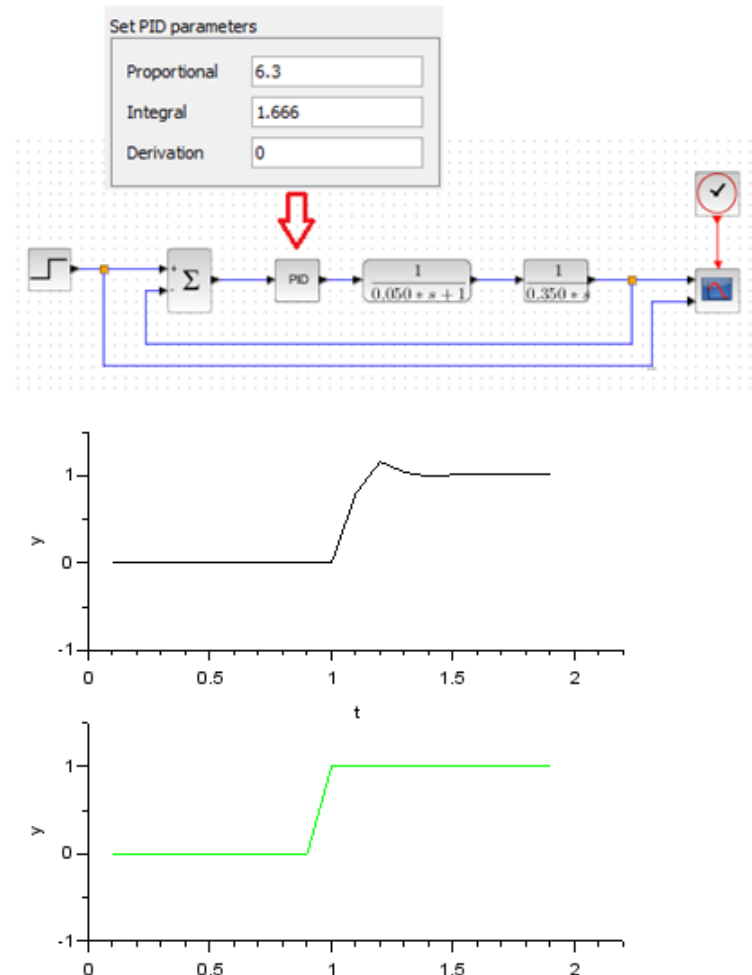
$$K_p = \frac{T}{L} = 0,9 \frac{350ms}{0,50ms} = 6,3 \quad (5)$$

$$\tau_i = \frac{T}{L} = \frac{0,50ms}{0,3} = 1,666 \quad (6)$$

É possível através da modelagem em planta real ainda fazer a modelagem em *software*, em que foi utilizado o SCILAB para tal. Foi então simulado a resposta ao degrau do sistema que servira para sintonia do controlador através de métodos

de sintonia. Conforme a Figura 26 o diagrama de blocos da planta no SCILAB.

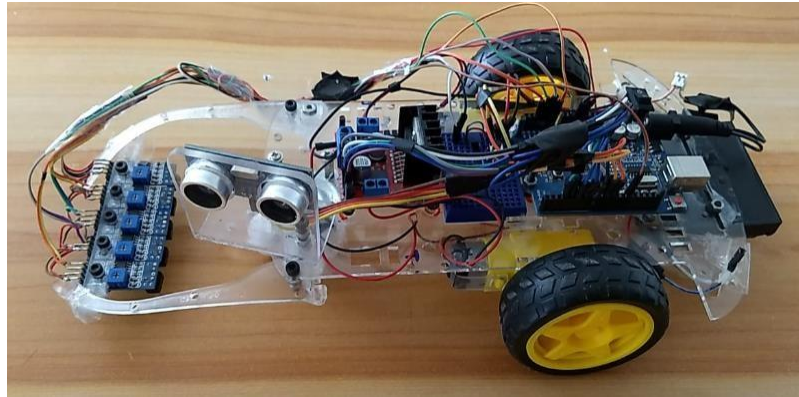
Figura 26 - Simulação da resposta ao degrau após sintonia das constantes da planta do AVG no SCILAB.



Fonte: Autor(2021).

Conforme a Figura 27 é possível ver o AVG em sua montagem final, com todos os ajustes necessários já ajustados.

Figura 27 - AGV em etapa concluída de montagem mecânica e eletrônica.

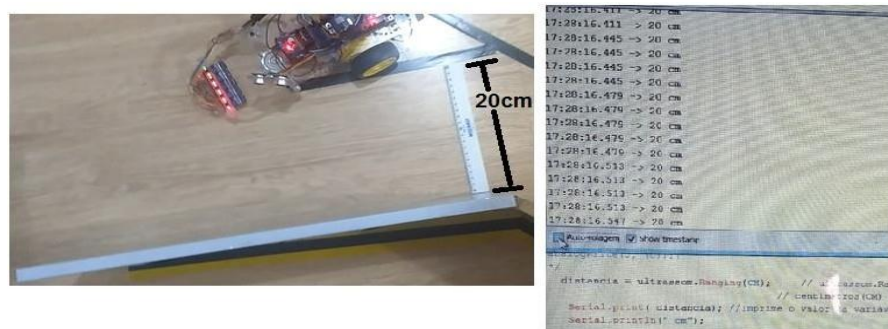


Fonte: Autor(2021).

O sensoriamento para obtenção de referência da posição do AVG no modo ultrassônico consistirá de um sensor (HC-SR04) na lateral do veículo, que quanto mais frontal melhor para o sistema de controle. Este trabalhará em malha fechada de controle com função de realimentação que subtraído ao *setpoint* gerará o erro que entrará na malha de controle e através do algoritmo PID, tendendo a estabilizar no *setpoint*, assim corrigindo o erro no modo proporcional, integral e se necessário derivativo.

Para implementação do sensor ultrassônico foi utilizada a biblioteca [ultrasonic.h](#), que já dispõe de todos os recursos matemáticos e conversões de medidas necessários para leitura de posição, sendo o sensoriamento muito preciso, para obtenção da resposta do sensor em valor medido é utilizado a comunicação serial do Arduino, assim podendo ser visualizado o valor medido e condizer com o real. Conforme a Figura 28 é possível a visualização do monitoramento serial da posição.

Figura 28 - Monitoramento *serial* do sensor ultrassônico na pista de teste.



Fonte: Autor(2021).

O sensoriamento para obtenção de referência de posição no modo óptico consistirá de 5 módulos sensores infravermelhos (TCRT 5000), montados lado a lado, os quais estão posicionados na parte frontal do veículo, onde é possível fazer uma lógica binária através das combinações possíveis dos sensores. Ao passar pela linha preta, onde é considerado que o sensor pode estar totalmente sobre a linha ou em transição entre ela, assim dois sensores detectando o sinal. Foram utilizados 5 sensores para se tentar obter uma linearidade maior, porém contínua sendo digital. O sistema que vai controlar possui uma dinâmica lenta, demora a reagir, com um tempo de acomodação de mais de 1 segundo, logo, a varredura do microcontrolador é tão rápida, que qualquer coisa que ocorra entre uma varredura e outra não será significativa. Por esta razão é considerado um sistema com microcontrolador, com programação em varredura, como um sistema contínuo no tempo.

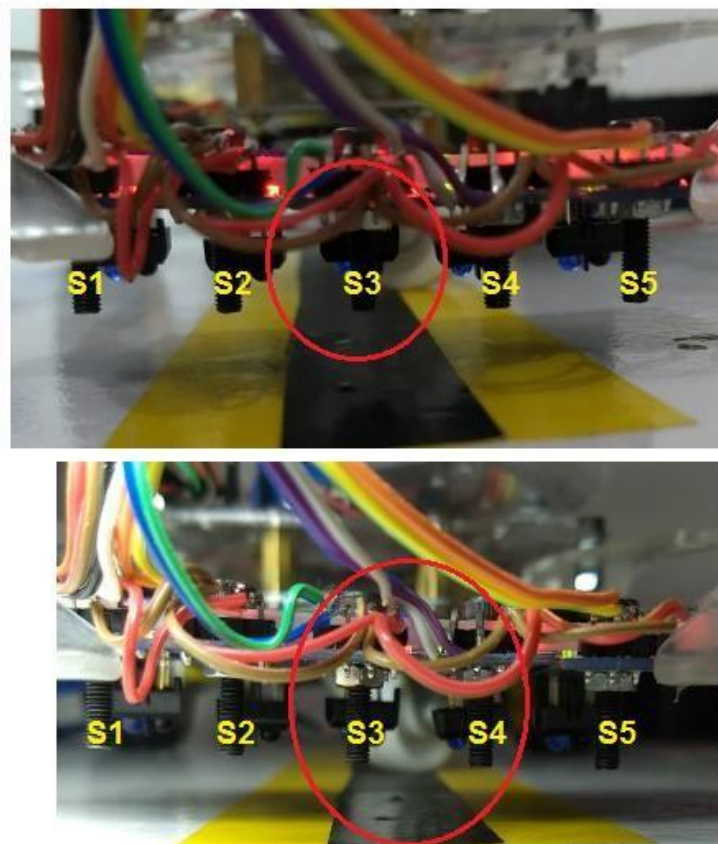
As combinações utilizadas foram:

- a) Valor "01111" se encontra 100% a esquerda;
- b) Valor "00111" se encontra 75% a esquerda;
- c) Valor "10111" se encontra 50% a esquerda;
- d) Valor "10011" se encontra 25% a esquerda;
- e) Valor "11011" se encontra 0% posição desejada;
- f) Valor "11001" se encontra 25% a direita;
- g) Valor "11101" se encontra 50% a direita;
- h) Valor "11100" se encontra 75% a direita;
- i) Valor "11110" se encontra 100% a direita;
- j) Valor "11111" fora de posição;
- k) Valor "00000" fora de posição.

Onde o valor de detecção dos sensores é igual a zero e o valor de lido 1 é quando os mesmos não estão sobre a faixa preta, assim sendo reflexivos.

Os valores dos sensores são coletados analogicamente e convertidos para digital, para ter uma melhor calibração do sistema, sem necessariamente mudar o valor do *trimpot* (resistor calibrável) de ajuste de sensibilidade. Através desta técnica é possível fazer um range de sensoriamento. Ainda é possível que o AVG passe totalmente os valores extremos, então foi criada uma rotina para gravar a última posição, até que o veículo volte a linha, se necessário. Figura 29 ilustra os sensores na faixa de detecção, onde sensores são representados pela letra S, seguido no número respectivo (S1, S2, S3, S4 e S5), onde representa a detecção unitária do sensor e a transição de posicionamento onde detecta dois sensores.

Figura 29 - Posição dos sensores na faixa de detecção.



Fonte: Autor(2021).

Ainda é possível a monitoração destes valores via *serial*, que auxiliam no aprimoramento e calibração para o desenvolvimento do protótipo, conforme é ilustrado na Figura 30.

Figura 30 - Monitoramento via *serial* dos valores dos sensores ópticos.

```

20:09:08.972 -> 's1' 1 's2' 1 's3' 0 's4' 1 's5' 1
20:09:09.006 -> 's1' 1 's2' 1 's3' 0 's4' 1 's5' 1
20:09:09.074 -> 's1' 1 's2' 1 's3' 0 's4' 1 's5' 1
20:09:09.108 -> 's1' 1 's2' 1 's3' 0 's4' 1 's5' 1
20:09:09.142 -> 's1' 1 's2' 1 's3' 0 's4' 1 's5' 1
20:09:09.176 -> 's1' 1 's2' 1 's3' 0 's4' 1 's5' 1
20:09:09.210 -> 's1' 1 's2' 1 's3' 0 's4' 1 's5' 1
20:09:09.244 -> 's1' 1 's2' 1 's3' 0 's4' 1 's5' 1
20:09:09.278 -> 's1' 1 's2' 1 's3' 0 's4' 1 's5' 1
20:09:09.346 -> 's1' 1 's2' 1 's3' 0 's4' 1 's5' 1
20:09:09.380 -> 's1' 1 's2' 1 's3' 0 's4' 1 's5' 1
20:09:09.414 -> 's1' 1 's2' 1 's3' 0 's4' 1 's5' 1
20:09:09.448 -> 's1' 1 's2' 1 's3' 0 's4' 1 's5' 1
20:09:09.482 -> 's1' 1 's2' 1 's3' 0 's4' 1 's5' 1
20:09:09.516 -> 's1' 1 's2' 1 's3' 0 's4' 1 's5' 1
20:09:09.584 -> 's1' 1 's2' 1 's3' 0 's4' 1 's5' 1

```

Fonte: Autor(2021).

Tendo em vista esses valores de sensoriamento, foram feitos dois programas para controle, apenas mudando os valores coletados pelos sensores, a lógica para tomada de decisões. A expertise do programa se baseia em três perguntas básicas para tomada de decisão, que são:

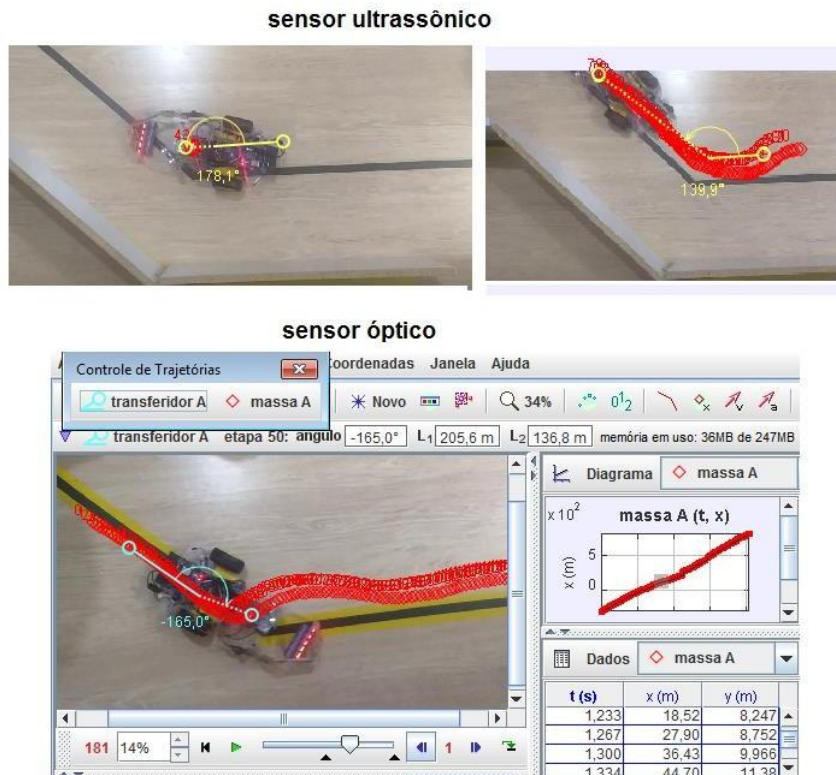
- a) Se a saída de controle igual a zero, os dois motores giram na mesma velocidade;
- b) Se controle for maior que zero, o motor da direita reduz a rotação proporcional ao com controle PID aplicado;
- c) Se controle for menor que zero, o motor da esquerda reduz a rotação proporcional ao com controle PID.

Para obtenção da resposta ao degrau foi aplicado o protótipo nos dois modos, seguidor de linha e por sensor ultrassônico, em suas respectivas pistas.

Foi então realizada a filmagem individual, de modo que a câmera capturasse o ângulo de vista superior do AGV e que não acontecessem oscilações no vídeo, pois prejudicaria na coleta de dados. Utilizado então o *software* TRACKER, para análise dos vídeos, no momento da respectiva curva de 45°, onde se busca a curva característica dos sensores, para tal foi analisado cada *frame* do vídeo, em que a análise parte do instante de tempo 0 segundos de reação, o instante inicial de mudança de direção quando, o sensor detecta o obstáculo diferencial do protótipo, até o momento em que o AGV estabiliza após fazer a curva, portanto a resposta ao degrau do sistema. A Figura 31 ilustra a forma de obtenção dos dados, onde são

analisados: variação da posição angular θ do AGV por tempo decorrido $t(s)$, para demarcação da distância de 20 cm foi colocado uma fita preta no chão, e paralela a pista do modo ultrassônico para melhor orientação na coleta de dados.

Figura 31 - Análise através de *software* para coleta de dados da resposta ao degrau nos modos de controle por sensor ultrassônico e por sensor óptico.



Fonte: Autor(2021).

Após a coleta dos dados então é transferido ao aplicativo de *software* Excel para plotagem dos gráficos para obtenção da resposta gerada, tendo como os resultados obtidos conforme representa a Tabela 1.

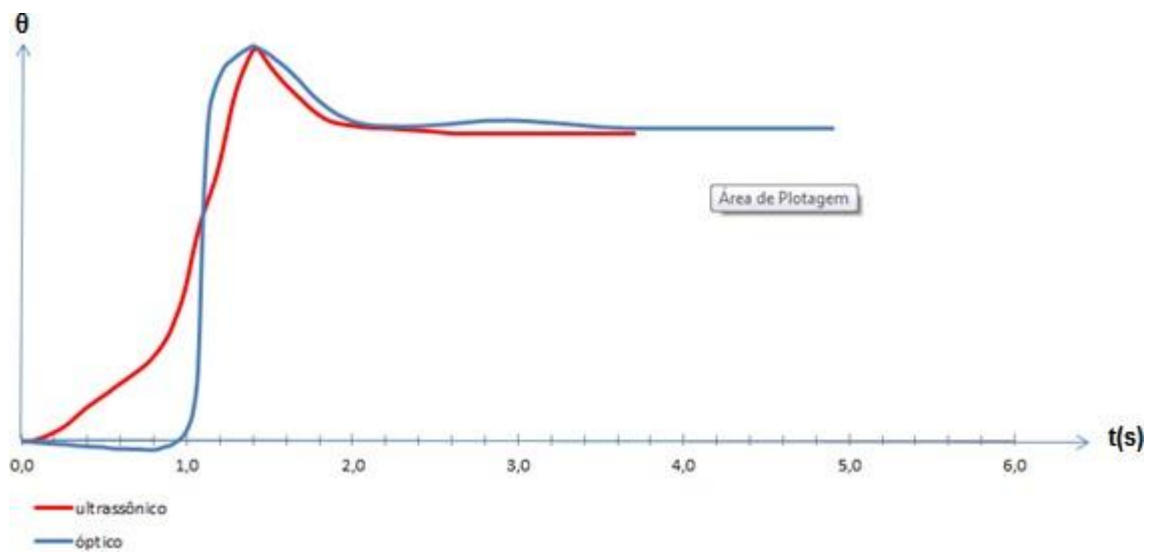
Tabela 1- Resposta ao degrau do AGV segundo as técnicas de sensoriamento.

Parâmetro	AGV com sensor óptico	AGV com sensor de proximidade
Máximo sobre-sinal (Mpp)	24,64 %	27,14 %
Tempo de subida	1,134 s	1,267 s
Tempo de acomodação	3,200 s	2,360 s

Fonte: Autor (2021).

E como resultado final a resposta ao degrau respectiva de cada método de sensoriamento, como demonstrado na Figura 32, em cor azul a curva respectiva da resposta ao degrau gerada pelo sensor óptico, em cor vermelha a curva respectiva da resposta gerada pelo sensor ultrassônico.

Figura 32 - Resposta ao degrau dos sensoriamentos.



Fonte: Autor(2021).

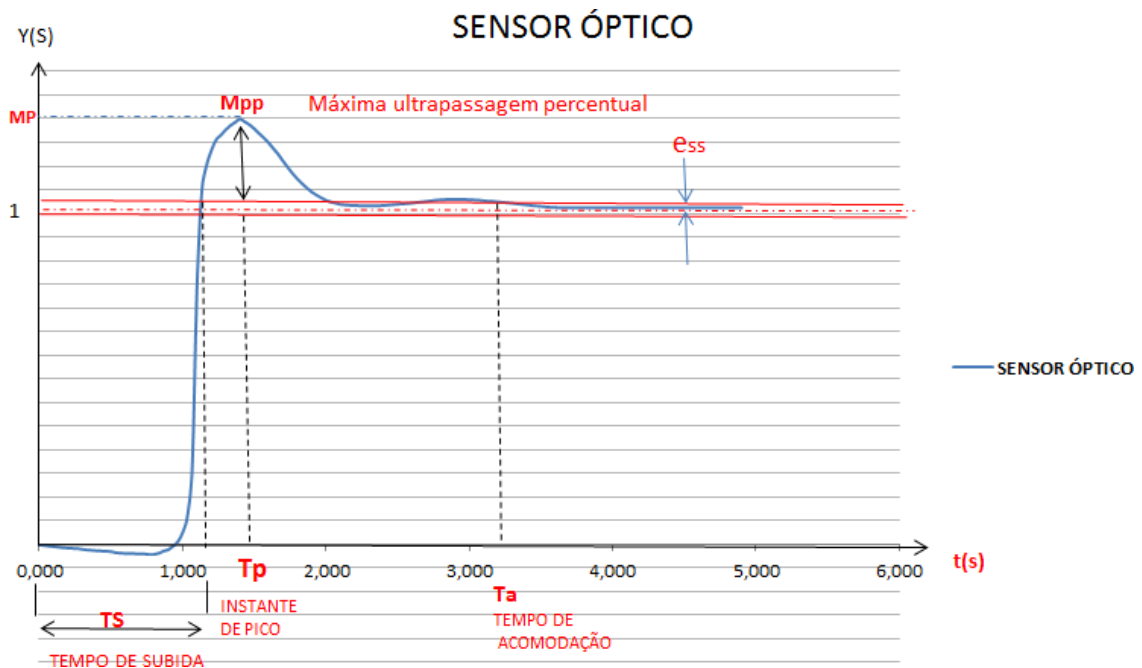
5 ANÁLISE

Nesta seção serão abordadas as diferenças e semelhanças entre as respostas obtidas, através dos métodos aplicados ilustradas por gráficos e dados, análise de navegação do protótipo estudado, resultados obtidos e esperados, salientando-se as principais características de cada modo.

5.1 ANÁLISE DA RESPOSTA AO DEGRAU NO MODO DE NAVEGAÇÃO POR SENSOR ÓPTICO

Na análise da resposta ao degrau do sensor óptico, onde o comportamento é ilustrado no gráfico conforme Figura 33.

Figura 33 - Curva característica do sensor óptico obtida.



Fonte: Autor(2021).

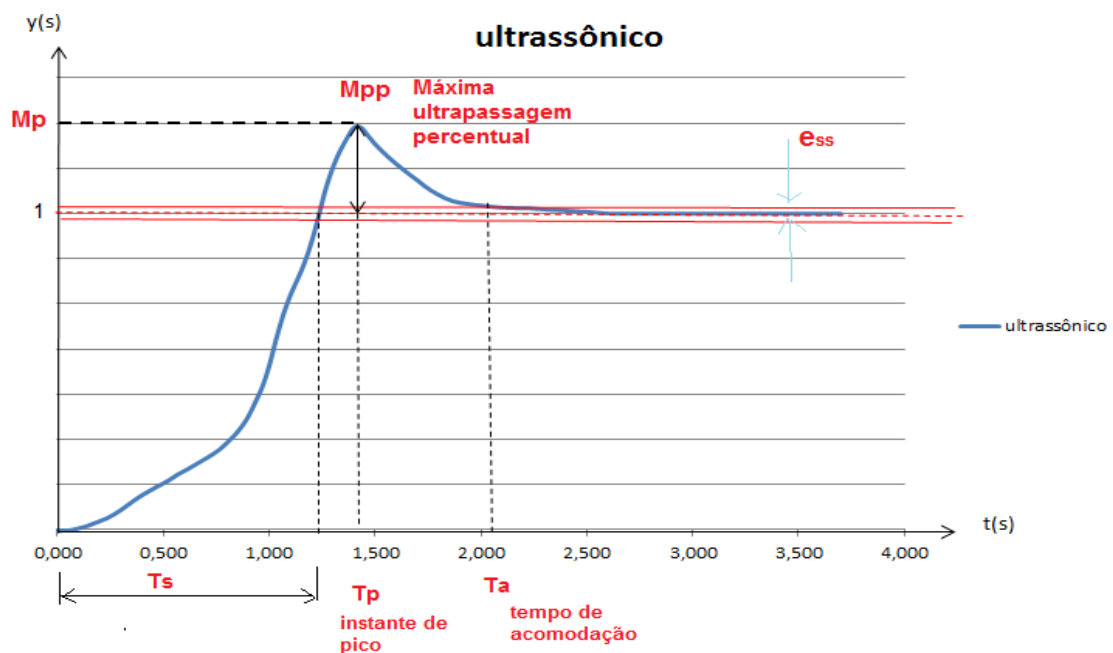
É possível notar a curva característica formada, onde se têm uma atuação mais instantânea, porém se têm um comportamento suave. Em comparação, é possível visualizar que o sistema não apresentou movimentos bruscos, tendo-se um instante de pico (T_s) relativamente bom, uma máxima ultrapassagem percentual (M_{pp}) satisfatória, parecido com o esperado, pode-se dizer que este gráfico ficou

condizente com a curva característica esperada, para esta resposta foi utilizado um sistema PI (proporcional e integral), conforme calculado nas equações (5) e (6).

5.2 ANÁLISE DA RESPOSTA AO DEGRAU NO MODO DE NAVEGAÇÃO POR SENSOR ULTRASSÔNICO

Na análise da resposta ao degrau do sensor ultrassônico, onde o gráfico é ilustrado conforme Figura 34, é possível notar a curva característica formada, em comparação com a Figura 31, pode-se notar a diferença da resposta onde o comportamento difere-se.

Figura 34 - Curva característica do sensor ultrassônico obtida.



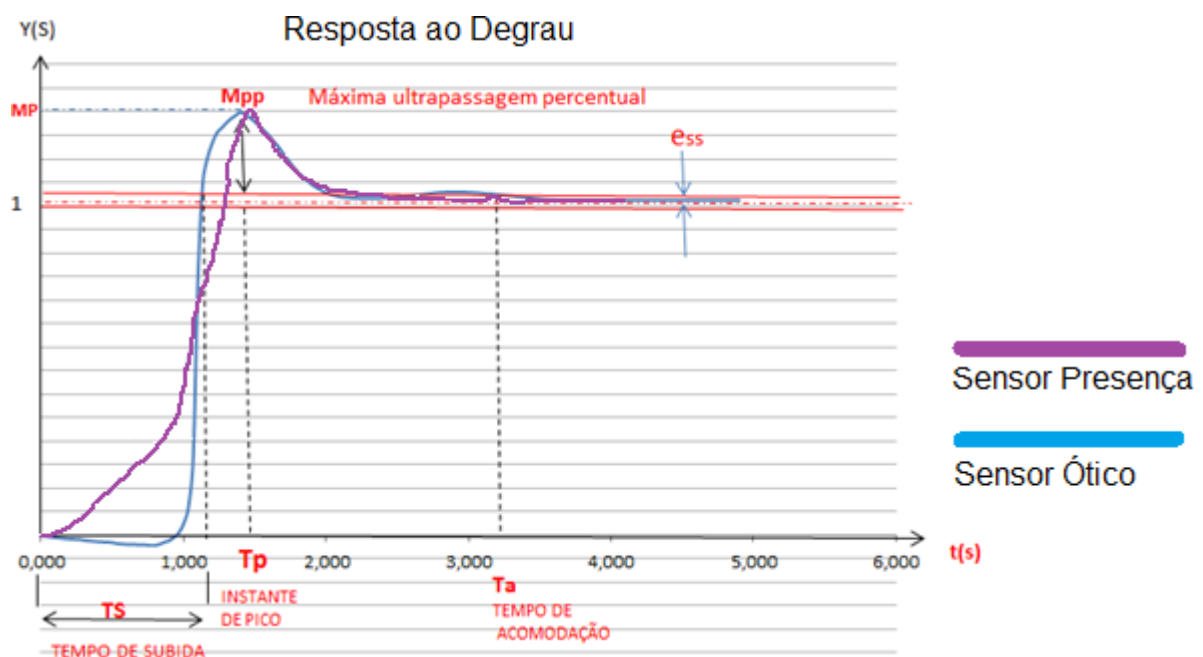
Fonte: Autor(2021).

O comportamento desta curva apresenta um tempo de subida maior (T_s), uma máxima ultrapassagem percentual (M_{pp}), muito próximo ao sensor óptico, porém um tempo de acomodação menor, ou seja o tempo de instante de pico até tempo de acomodação pode-se dizer que é significativamente menor.

5.3 COMPARAÇÃO DOS RESULTADOS

Conforme os dados gráficos da Figura 35, são possíveis as comparações dos resultados obtidos, através da aplicação dos métodos de sensoriamento óptico e ultrassônico, que representa uma comparação das duas respostas ao degrau geradas, possível a constatação das diferenças dos sensores.

Figura 35 – Resposta ao degrau sobreposta do AGV com sensor de presença e sensor óptico.



Fonte: Autor(2021).

Embora haja certas diferenças nas curvas é possível notar que a máxima ultrapassagem percentual (M_{pp}) dos dois se mantiveram muito próximas, variando poucos segundos os parâmetros abordados. Tais diferenças nas respostas, conforme análise realizada, são dadas pelas diferenças de leituras dos sensores, ou seja o sensor no modo óptico utiliza-se de 5 sensores de forma que através de uma técnica e expertise gere um sinal perto do linear, porém seu *range* é muito curto mesmo assim, tendo em vista que o mesmo é um sensor digital funcionando em uma lógica binária ou seja há uma limitação de possibilidades já pré-determinadas.

Já o sensor ultrassônico por sua vez, conta com um *range* muito maior, tendo uma leitura com muita precisão milimétrica, assim sendo de forma analógica mais

gradual e obtendo uma resposta com menos oscilações e mais rapidez no sistema, ou seja, o sensor ultrassônico em uma comparação tem inúmeras possibilidades variando de acordo com a sua capacidade de leitura (*range*) e uma taxa de dados que entra nos sistemas maior, assim pode-se dizer que o sistema inicialmente no degrau atue de forma mais lenta, porém a correção é mais rápida e gradual, pois é linear.

5.4 ANÁLISE DO PROTÓTIPO AO PERCORRER TRAJETOS DE FORMA AUTÔNOMA

Foi observado que as respostas dos veículos ao percorrerem a trilha utilizando ambos modos propostos, consideradas satisfatórias para atender a hipótese proposta, pois foi possível a caracterização dos modos.

Contrariando as expectativas, não foram observadas grandes diferenças e oscilações nos pontos de resposta ao degrau. Uma grande diferença no controle e sua precisão é a posição dos sensores, onde foi notado que quanto mais a frente do veículo, mais suave, rápido, preciso o veículo ficará, pois aumenta o tempo de resposta do processamento. Foi visto que o próprio peso e inércia do AGV acabam por contribuir para que o controle seja mais preciso, visto que o PWM tem uma taxa de atuação onde: valor muito baixo, os motores param e em valores altos os mesmos tornam o controle instável.

Ocorrem movimentos bruscos nas curvas, tornando o sistema marginalmente instável. Para correção foi então limitado o valor máximo de PWM no programa, obtendo assim para um melhor controle e trajetória.

6 CONCLUSÃO

A hipótese abordada de uma caracterização de sistemas de controle de transporte, através de testes e ensaios em protótipo de baixo custo, que auxiliam na tomada de decisão quanto ao tipo de sensoriamento, se confirmou pois através do experimento realizado em diferentes ambientes e sensores de navegação é possível a visualização dos resultados das caracterizações dos sistemas, assim auxiliando na tomada de decisões de aplicações futuras, em diferentes universos, sejam eles domésticos, fabris ou de transporte.

Nos sistemas de navegação autônoma que tendem a ser crescentes na indústria e no cotidiano, existem muitos estudos e já aplicações existentes, porém a importância deste trabalho é o teste em máxima resposta de um sistema de controle.

As dificuldades deste trabalho foram no seu início, nas definições de parâmetros, cálculos, definições de velocidade e definições de testes mais adequadas.

A programação também foi um dos pontos que mais necessitaram atenção.

Outras limitações são da construção mecânica, pois o acrílico utilizado é muito frágil e quebradiço, logo não pode-se colocar muito peso sobre o mesmo.

Para implementação de fato deste trabalho foi utilizado conhecimento de diversas áreas do curso superior em tecnologia da automação industrial, pois foram utilizados conhecimentos em física, programação, sistemas de controle, cálculo, redes industriais, máquinas elétricas, eletrônica analógica e digital, entre outros, justificando este estudo como trabalho de conclusão de curso.

Este trabalho, porém, focou principalmente no componente curricular de sistemas de controle.

Para trabalhos futuros, sugere-se a adequação de mais métodos de navegação, implementação de métodos de navegação híbridos em diferentes ambientes, ou seja com a utilização de dois ou mais sensores para controle. Sugere-se também a utilização de uma interface para que se possa visualizar os valores de controle em tempo real e que nela se possa mudar os parâmetros de controle, bem como também mudar o modo de navegação, sem a necessidade de recompilar o programa do microcontrolador.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDI (Brasília). Agência Brasileira de Desenvolvimento Industrial. **INOVAÇÃO, MANUFATURA AVANÇADA E O FUTURO DA INDÚSTRIA: uma contribuição ao debate sobre as políticas de desenvolvimento produtivo. UMA CONTRIBUIÇÃO AO DEBATE SOBRE AS POLÍTICAS DE DESENVOLVIMENTO PRODUTIVO.** 2017. Disponível em: <https://conhecimento.abdi.com.br/conhecimento/Publicaes1/Inova%C3%A7%C3%A3o%20manufatura%20avan%C3%A>. Acesso em: 03 dez. 2020

ALMEIDA, Lucas Felipe Araújo. **Veículo autoguiado (AGV – Automated Guided Vehicle) – protótipo seguidor de linha.** 2016. 83 f. Trabalho de Conclusão (Graduação) – Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2016. Disponível em: http://www2.dee.cefetmg.br/wp-content/uploads/sites/18/2017/11/TCC_2016_1_LFAAlmeida.pdf. Acesso em 2 out. 2020.

BORTOLON, Henrique. **Controle Lateral de um Veículo Guiado Automaticamente.** 2018. 77 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Elétrica, Departamento de Engenharia Elétrica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2018.

BRITES, Felipe Gonçalves; SANTOS, Vinicius Puga de Almeida. **Motor de Passo.** Niteroi: Universidade Federal Fluminense, 2018. 15 p.

BRITO, José Marcos Mota; ALMEIDA, Elinilcia Ribeiro; SILVA, Mayko Pinheiro; SANTIAGO, Sandro Breval; SOUZA JÚNIOR, Armando Araújo. Aplicação de veículo guiado automaticamente nas diversas áreas de produção da indústria: revisão sistemática da literatura. **Brazilian Journal Of Development**, [S.L.], v. 6, n. 2, p. 9486-9502, 2020. Brazilian Journal of Development. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv6n2-310>.

COELHO, Pedro Miguel Nogueira. **Rumo à Indústria 4.0.** 2016. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Coimbra, Coimbra, 2016. Disponível em: <https://eg.uc.pt/bitstream/10316/36992/1/Tese%20Pedro%20Coelho%20Rumo%20%C3%A0%20Industria%204.0.pdf>. Acesso em 13 out. 2020.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. **Sistemas de controle moderno.** 8. ed. Rio de Janeiro: LTC editora, 2001. 656 p. Tradução: Bernardo Severo da Silva Filho.

DREGER, Rubem Sprenger. **Construção e avaliação do desempenho de um veículo autoguiado : AGV, de baixo custo, para uso em ensino e pesquisa.** 2001. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós-graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/198639>. Acesso em 13 out. 2020.

FEROLDI, Regis Trojan. **Modulação senoidal bipolar PWM aplicada em inversores de frequência**. 2011. 88 f. TCC (Graduação) - Curso de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2011.

JUNG, Cláudio Rosito; OSÓRIO, Fernando Santos; KELBER, Christian Roberto; HEINEN; Farlei José. Computação embarcada: Projeto e implementação de veículos autônomos inteligentes. **Anais do Congresso da Sociedade Brasileira de Computação**, v. 5, pp. 1358-1406, 2005. Disponível em: <http://osorio.wait4.org/publications/Jung-et-al-JAI2005.pdf>. Acesso em 22 nov. 2020.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson, 2010. 801 p. Tradutora: Heloísa Coimbra de Souza.

OTTONI, Guilherme de Lima; LAGES, Walter Fetter. Navegação de robôs móveis em ambientes desconhecidos utilizando sonares de ultra-som. **Sba: Controle & Automação Sociedade Brasileira de Automatica**, [S.L.], v. 14, n. 4, p. 402-411, dez. 2003. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s0103-17592003000400008>.

PEREIRA, Adriano; SIMONETTO, Eugênio de Oliveira. INDÚSTRIA 4.0: CONCEITOS E PERSPECTIVAS PARA O BRASIL. **Revista da Universidade Vale do Rio Verde**, Três Corações: Universidade Vale do Rio Verde. v. 16, n. 1, p. 1-9, 15 jul. 2018. Semestral.

PHYSLETS. **Tracker**: análise de vídeo e ferramenta de modelagem. análise de vídeo e ferramenta de modelagem. 2020. Disponível em: <https://physlets.org/tracker/>. Acesso em: 16 nov. 2020.

SIMÕES, Wagner Lourenzi; VECCHIA, Rodrigo dalla; SILVA, Macáliston Gonçalves da. Proposição de um modelo de otimização para programação da produção em Sistema Flexível de Manufatura (FMS) com tempos de setup dependentes da sequência: a combinação de esforços em sequenciamento e tempos de preparação na indústria eletrônica. **Produto & Produção**: Revista quadrimestral do programa de pós-graduação em engenharia de produção da Universidade do Rio, Porto Alegre, v. 16, p. 81-99, mar. 2015. Quadrimestral. Disponível em: <https://www.seer.ufrgs.br/ProdutoProducao/article/viewFile/50034/33696>. Acesso em 2 set. 2020.

SOUZA, Jose de; ROYER, Rogerio. Implantação de um sistema AGV - veículo guiado automaticamente um estudo de caso. In: Encontro Nacional De Engenharia De Produção. Salvador: ENEGEP, v. 33, p. 1-16. 2013. Disponível em: http://www.abepro.org.br/biblioteca/enegep2013_TN_STO_177_010_22461.pdf. Acesso em 22 out. 2020.

SQUIDS. **Como usar o módulo sensor de refletância IR para identificar uma faixa - Arduino**. 2020. Disponível em: <http://www.squids.com.br/arduino/index.php/projetos-arduino/projetos-squids/intermediario/289-i04-usar-o-modulo-sensor-de-refletancia-ir-para-identificar-uma-faixa-arduino>. Acesso em: 03 out. 2020.

THOMAZINI, Daniel; ALBUQUERQUE, Pedro Urbano Braga de. **Sensores**

industriais: fundamentos e aplicações. 4. ed. [S.l]: Érica, 2011. 220 p.

ULLRICH. Automated guided vehicle systems. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, Springer, 2015.