



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA ELÉTRICA - PATOS DE MINAS
ENGENHARIA ELETRÔNICA E DE TELECOMUNICAÇÕES

ALLAN DAYRELL BRAGA MATTAR HANDAN

**PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM CARRO AUTÔNOMO SEGUIDOR DE
LINHA E APLICAÇÃO DE UM ALGORITMO GENÉTICO NA OTIMIZAÇÃO DO PID**

PATOS DE MINAS
2017

ALLAN DAYRELL BRAGA MATTAR HANDAN

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM CARRO AUTÔNOMO SEGUIDOR DE LINHA E APLICAÇÃO DE UM ALGORITMO GENÉTICO NA OTIMIZAÇÃO DO PID

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Orientador: Prof. Me. Júlio Cezar Coelho

Co-orientador: Prof. Dr. Laurence Rodrigues do Amaral

PATOS DE MINAS

2017

ALLAN DAYRELL BRAGA MATTAR HANDAN

PROJETO E DESENVOLVIMENTO DE UM CARRO AUTÔNOMO SEGUIDOR DE LINHA E APLICAÇÃO DE UM ALGORITMO GENÉTICO NA OTIMIZAÇÃO DO PID

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado à Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de bacharel em Engenharia Eletrônica e de Telecomunicações.

Aprovado em: ____ de ____ de ____.

BANCA EXAMINADORA

Prof.Me. Júlio Cezar Coelho – UFU – orientador

Prof.Dr. Laurence Rodrigues do Amaral – UFU – co-orientador

Prof.Dr. André Luiz Aguiar da Costa - UFU

Prof^a.Dr^a Eliana Pantaleão - UFU

PATOS DE MINAS

2017

Dedico este trabalho a minha família, em especial a minha mãe, Sofia Lenira Braga,
e a minha namorada, Bruna de Carvalho Canedo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família, por estar comigo por todos estes anos, me dando apoio em todos os momentos, em especial a minha mãe, Sofia Lenira Braga.

Agradeço a minha namorada, Bruna de Carvalho Canedo, por todo apoio e por me ajudar nos momentos difíceis, além de ter me aturado até hoje.

Agradeço ao Prof. Dr. Laurence Rodrigues do Amaral por tornar este projeto possível e por todo apoio dedicado à sua implementação durante todo o período de desenvolvimento.

Agradeço ao Prof. Me. Júlio Cezar Coelho pelo apoio e orientação que me foi dedicado.

Agradeço ao meu amigo e colega de curso, Marcelo Teixeira Masson, que participou de todas as decisões e processos de implementação.

Agradeço a toda equipe de técnicos de eletrônica da UFU, em especial aos técnicos Afonso Januário Pujoni Soares, Vilmondes Ribeiro Silva e Daniel Araújo, que deram apoio em várias etapas de desenvolvimento.

Agradeço aos meus amigos e colegas, cuja amizade tornou esses anos mais fáceis.

Agradeço o apoio da CAPES e FAPEMIG, órgãos fomentadores e parceiros que patrocinaram bolsas de estudos no Edital Jovens Talentos (CAPES) e no Edital Santos Dumont (FAPEMIG), permitindo assim a implementação deste projeto.

RESUMO

Neste trabalho de conclusão de curso será apresentado o processo de construção de um carro autônomo seguidor de linha, veículo capaz de percorrer um trajeto demarcado por uma faixa, tecnologia possível de ser implementada em veículos de transporte humano ou de cargas. Para melhorar a eficiência do sistema de controle do veículo, ajudá-lo a completar um trajeto no menor tempo possível e a minimizar as oscilações na movimentação do carro quanto ao limite da pista, foi implementado um PID (proporcional, integral e derivativo), onde se faz o uso dos ganhos proporcional, integral e derivativo, de modo a ajustar a tensão média nos motores. Para otimizar os coeficientes do PID, foi implementado um Algoritmo Genético (AG), que se trata de um método da Inteligência Artificial (IA). Durante o processo de otimização, o AG gera uma série de combinações para os coeficientes de forma aleatória (num primeiro momento), avaliando o resultado obtido com cada combinação gerada, e, através de um processo evolutivo, define o melhor resultado obtido.

Palavras-chave: Veículo autônomo, Robô seguidor de linha, Algoritmos Genéticos, Inteligência Artificial, Otimização, PID.

ABSTRACT

In this document of course conclusion, the process of construction of a follower line autonomous car will be presented. This vehicle is capable of traveling a path marked by a line, technology possible to be implemented in vehicles for human transport or cargo. In order to improve the efficiency of the vehicle controller system, to help it to complete a route in the shortest time possible and to minimize the oscillations in the car's movement in relation to the runway limit, a PID (proportional derivative integrative) was implemented, the developed system uses proportional, integral and derivative gains in order to adjust the average voltage in the motors. To optimize the PID coefficients, a Genetic Algorithm was implemented, which is a method of Artificial Intelligence. During the optimization process, the AG generates a series of combinations for the coefficients at random (in the first time), evaluating the result obtained with each combination generated, and, through an evolutionary process, define the best result obtained.

Keywords: Autonomous car, Line follower robot, Genetic Algorithms, Artificial Intelligence, Optimization, PID.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Composição de um microcontrolador	14
Figura 2: Esquema de chaveamento e corrente de uma ponte H	17
Figura 3: Máximo local e Máximo global	19
Figura 4: Fluxograma de um Algoritmo Genético	20
Figura 5: Esquema da estrutura e disposição dos componentes no carro	24
Figura 6: Faces da placa de circuito impresso	25
Figura 7: O carro autônomo seguidor de linha finalizado	25
Figura 8: Estrutura dos cromossomos e genes binários de um indivíduo	27
Figura 9: Processo de crossover com pontos de cortes respectivamente 2,6 e 4.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1:Valores de PID e velocidade utilizados no carro e o menor tempo obtido para cada dia de competição	30
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG – Algoritmo Genético

A/D – Conversor analógico/digital

CC – Corrente Contínua

D/A – Conversor digital/analógico

EUA – Estados Unidos da América

FAPEMIG – Fundação de Amparo à Pesquisa de Minas Gerais

IDE – *Integrated Development Environment*

MPU – *Micro Processor Unit*

PID – Proporcional, Integral e Derivativo

PWM – *Pulse Width Modulation*

RAM – *Random access memory*

ROM – *Read-only memory*

RPM – Rotações por minuto

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
1.1. Introdução Teórica.....	12
1.2. Resumo	13
2. DESENVOLVIMENTO.....	14
2.1. Microcontroladores.....	14
2.2. Sensores	15
2.3. Motores CC com Redução.....	15
2.4. Ponte H.....	17
2.5. PID	17
2.6. Algoritmos Genéticos	18
2.7. Resumo	21
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	22
3.1. Estrutura e Componentes	22
3.2. Programação	26
3.3. Implementação do Algoritmo Genético.....	27
3.4. Resumo	29
4. RESULTADOS OBTIDOS E CONCLUSÃO	30
5. REFERÊNCIAS	33

1. INTRODUÇÃO

Neste tópico será feita uma breve introdução, apresentando alguns conceitos relacionados a sistemas autônomos, que são sistemas capazes de operar sem a intervenção humana, representando uma das características do veículo desenvolvido neste projeto. Sendo também abordado de forma breve, uma relação dos componentes que foram necessários na implementação do projeto.

1.1. Introdução Teórica

A tecnologia está abrindo novos horizontes para o desenvolvimento nos mais diversos campos da sociedade. Um desses representativos avanços é registrado com o surgimento de sistemas e máquinas autônomas, que funcionam e trabalham incessantemente, sem a necessidade de controle humano, trazendo mais comodidade, segurança e alavancando a economia.

O termo autônomo se refere a sistemas que apresentam a capacidade de operar no mundo real sem qualquer forma de controle e intervenção externa por longos períodos de tempo, capazes de se adaptar a mudanças ambientais e a executar funções ou tarefas previstas pelos seus desenvolvedores (BEKEY, 2005).

Nos últimos anos, a comunidade científica tem destinado um grande esforço em pesquisas no que se refere a veículos com capacidade de navegação autônoma, ou seja, que navegam sem a necessidade de um condutor (GONÇALVES, 2011). Empresas conhecidas mundialmente já demostram resultados obtidos com seus esforços, como é o caso do Google com o Google Car, que já está fazendo testes de tráfego em Mountain View, cidade do estado da Califórnia, EUA.

Nos processos de desenvolvimento desses veículos, é necessário incluir a aplicação de vários módulos de sensores com diversas funções, a fim de obter as informações necessárias para sua orientação perante o ambiente externo. Um desses módulos é o de detecção de faixa na pista, que é utilizado tanto para corrigir a direção de um veículo e alertar o motorista, como é o caso do *Driver Alert* da Ford, quanto para a navegação autônoma de veículos que devem seguir uma faixa na pista, como é o caso do foco deste projeto.

Este projeto foi realizado com o apoio e o fomento da FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa de MG) através do projeto aprovado no Edital Santos Dumont. Foram visados dois objetivos para este projeto. O primeiro se tratou da construção de um carro autônomo seguidor de linha, para participar na categoria “Seguidor de Linha - Pro” da 12ª edição do *Winter Challenge*, que é o maior torneio de robôs da América Latina. Para a implementação deste projeto foi necessário fazer pesquisas a fim de determinar quais critérios deveriam ser atendidos e quais os componentes necessários para a construção do veículo.

Determinou-se que seriam necessários diversos componentes, dentre eles motores de corrente contínua, ponte H, bateria, regulador de tensão, placa de circuito impresso e sensores. Além de um microcontrolador que irá processar as informações e tomar as decisões necessárias para que o carro percorra todo o trajeto de forma autônoma e sem sair da pista (HANDAN, AMARAL e MASSON, 2016).

O segundo objetivo foi criar um AG (Algoritmo Genético) para realizar um ajuste fino no controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) do carro, de modo a otimizar seu funcionamento e torna-lo mais estável na pista. Assim, pode-se comprovar a eficiência desta ferramenta de Inteligência Artificial quando aplicada a sistemas mecânicos e eletrônicos.

Um estudo mais detalhado dos componentes utilizados e sobre Algoritmos Genéticos será feito no tópico de desenvolvimento.

1.2. Resumo

Foi abordada neste tópico, uma breve introdução sobre sistemas autônomos, os quais apresentam a capacidade de operar por longos períodos de tempo sem nenhuma intervenção externa. Além disso, foram apresentados os objetivos do projeto, assim como alguns critérios para sua implementação.

2. DESENVOLVIMENTO

Neste tópico serão apresentados conceitos importantes sobre os principais componentes utilizados na confecção do carro, sendo também realizada uma abordagem sobre o método de controle PID e Algoritmos Genéticos.

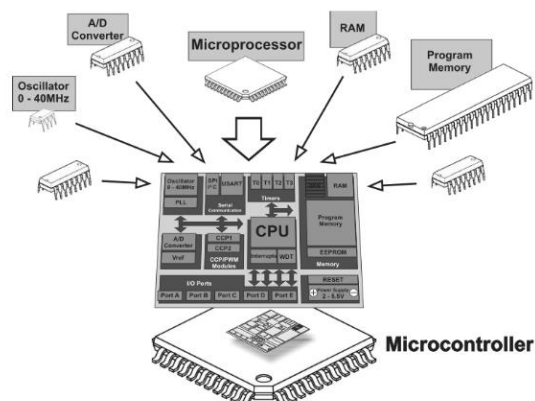
No subitem a seguir será apresentado um conceito sobre microcontroladores.

2.1. Microcontroladores

Microcontroladores ou MPU's (*Micro Processor Unit*) são unidades de controle assim como os microprocessadores, porém, são dispositivos mais simples, que já apresentam diversos recursos de maneira interna, como as memórias RAM (*Random access memory*) e ROM (*Read-only memory*), portas de entrada e saída, oscilador de *clock*, conversores A/D (conversor analógico/digital) e D/A (conversor digital/analógico), entre outros (PEREIRA, 2002).

Os microcontroladores foram projetados para conter os componentes necessários incluídos dentro de um único chip, de modo a dispensar o uso de componentes externos na maioria de suas aplicações, assim, economizando o tempo e o espaço necessários para se projetar um dispositivo (PEREIRA). A Figura 1 a seguir ilustra um microcontrolador e alguns de seus principais recursos.

Figura 1: Composição de um microcontrolador



Fonte: (PEREIRA)

O microcontrolador será utilizado no veículo para controle dos motores e receberá sinal dos sensores.

No próximo subitem será abordada uma introdução sobre sensores.

2.2. Sensores

Sensores são componentes capazes de detectar alguma forma de estímulo externo ao sistema, ou seja, trata-se de um recurso indispensável quando um sistema precisa obter alguma informação sobre o ambiente (BEKEY, 2005).

No projeto de desenvolvimento deste carro autônomo seguidor de linha, faz-se necessário o uso de sensores conhecidos como fotodetectores. Esses sensores são capazes de converter sinais luminosos de certa potência em uma corrente elétrica proporcional. O sinal gerado por estes sensores pode ser tratado por um microcontrolador, que poderá utilizar esta informação para tomar alguma decisão. Neste projeto, o sinal gerado pelos fotodetectores irá informar ao microcontrolador se a linha está ou não embaixo do sensor, permitindo que o sistema determine sua orientação quanto ao caminho que deve ser percorrido (BOYLESTAD e NASHELSKY, 2004) (MALVINO, 1995).

No subitem a seguir será feita uma introdução sobre outro componente utilizado no projeto, os motores CC com redução.

2.3. Motores CC com Redução

O motor de corrente contínua trabalha através das forças de atração e repulsão entre as bobinas do rotor e os eletroímãs do estator. O rotor é composto por bobinas de material condutor, essas bobinas estão submetidas a um campo magnético gerado pelos ímãs do estator, ao alimentar o rotor com uma corrente elétrica, é gerada uma força que gera um movimento relativo entre estes componentes, produzindo assim energia mecânica (KOSOW, 1982).

Porém, é necessário fazer uma inversão dos polos das bobinas a fim de que o rotor permaneça girando, caso contrário, a força de atração e repulsão que atuam sobre o sistema irá direcionar os polos magnéticos das bobinas para os polos inversos do estator, ocasionando a interrupção do movimento. Essa inversão dos polos é feita a partir da inversão da corrente de alimentação pelo comutador.

O comutador é o componente que transmite a corrente para as bobinas através de contatos elétricos e escovas, de modo que, a cada meia volta, os contatos elétricos são invertidos, mudando o sentido da corrente que passa entre as bobinas, perpetuando a rotação do rotor.

A velocidade e o torque do motor dependem da potência que o alimenta. Um modo de regular a alimentação do motor a fim de exercer um controle sobre sua velocidade é o uso de PWM (*Pulse Width Modulation*). O uso do PWM permite controlar a largura do pulso sobre o motor, de modo a alterar a potência média fornecida, podendo aumentá-la ou reduzi-la à medida em que se aumenta ou reduz a largura do pulso. Além da potência média fornecida, outra interferência no funcionamento do motor é a relação entre torque e velocidade.

Um mecanismo utilizado para fazer uma transferência entre torque e velocidade é a caixa de redução. Motores com caixa de redução 30:1 por exemplo, tem uma rotação na saída da caixa 30 vezes menor que a do rotor, de modo que ocorre o aumento do torque. Quanto maior é a força que o motor deve exercer, maior é o torque necessário. Neste projeto em especial, quanto maior o peso do carro, maior deve ser o torque.

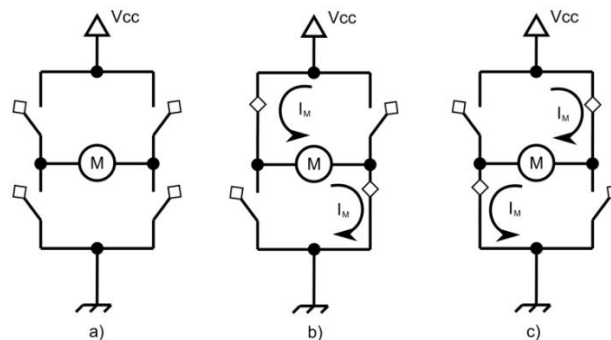
Outra questão importante com relação aos motores CC é que o sentido de rotação depende do sentido em que a corrente é aplicada sobre ele. No subitem a seguir, será feita uma introdução sobre a ponte H, componente que permite uma adequação da tensão da bateria com a tensão do motor.

2.4. Ponte H

Em projetos utilizando motores de corrente contínua, é comum fazer uso da ponte H para controlar o sentido de rotação dos motores.

A ponte H é um dispositivo que permite o controle bidirecional do sentido de rotação do motor através da manipulação do sentido em que a corrente é aplicada sobre ele, permitindo inverter sua rotação, além de fazer a interface sobre a tensão da bateria com o nível de tensão requerido nos motores. A Figura 2 abaixo representa a manipulação exercida pela ponte H através do chaveamento.

Figura 2: Esquema de chaveamento e corrente de uma ponte H



Fonte: (athoselectronics, 2016)

No próximo subitem serão apresentados conceitos sobre controladores PID.

2.5. PID

Neste subitem, serão abordados conceitos base sobre controladores automáticos PID. Controladores automáticos são sistemas que determinam o desvio da resposta de um processo, comparando seu valor real na saída com o valor esperado. Esse desvio é utilizado para produzir um sinal de controle, através de ações de controle, com o objetivo de anulá-lo ou minimizá-lo (OGATA, 1982).

As ações de controle mais conhecidas são as do tipo proporcional, integral e derivativo. A atuação direta sobre o ganho do sistema é realizada pela ação proporcional, já as ações integral e derivativa estão relacionadas respectivamente à

melhoria da precisão de resposta e à correção antecipada do erro. O controlador que inclui essas três ações é conhecido como controlador PID (proporcional, integral e derivativo), sendo amplamente utilizado nas áreas de sistemas de controle (SWIECH, OROSKI e ARRUDA, 2005).

Sua popularidade é atribuída por apresentar um bom desempenho em uma grande faixa de condições de operação e também a sua relativa simplicidade funcional que permite uma operação simples e direta (DORF e BISHOP, 2001).

Porém, para a configuração de um controlador PID, é necessário definir seus três coeficientes, que representam os ganhos proporcional (K_p), integral (K_i) e derivativo (K_d), sendo um problema de busca em um espaço tridimensional. Vários métodos têm sido propostos para a determinação desses coeficientes, mas, em vários casos um especialista estima os valores iniciais, e ao observar a resposta, estima novos valores caso julgue necessário.

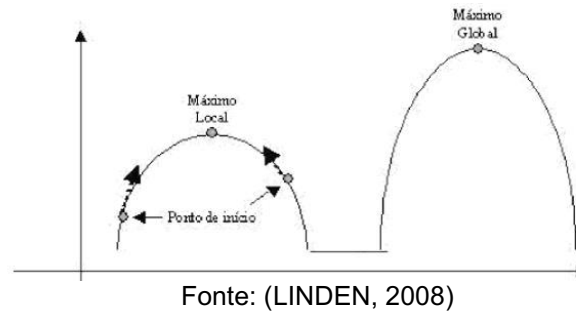
Neste projeto, a definição desses coeficientes será definida utilizando-se uma técnica computacional conhecida como Algoritmos Genéticos, descrita no próximo subitem.

2.6. Algoritmos Genéticos

Um Algoritmo Genético é uma técnica de busca pertencente à Inteligência Artificial, baseada nos mecanismos de seleção natural e na genética natural, relacionando os conceitos de sobrevivência do indivíduo mais apto ao ambiente aos mecanismos de evolução das espécies (GOLDBERG, 1989).

Os Algoritmos Genéticos são utilizados como metodologia de pesquisa e otimização de funções e sistemas complexos envolvendo espaços multidimensionais, irregulares ou multimodais (SILVA, SILVA e BACCARINI, 2014). Sendo uma técnica heurística de otimização global, não é possível garantir que a solução ótima do sistema seja encontrada, mas sim que serão encontradas boas soluções em cada execução, não necessariamente todas as vezes, podendo-se assim, obter resultados como máximos ou mínimos locais, próximos ou não do ótimo global. A Figura 3 a seguir representa o conceito de máximos locais e máximos globais de uma função.

Figura 3: Máximo local e Máximo global



A implementação de um Algoritmo Genético depende de seguir algumas etapas muito importantes, como gerar a população inicial, avaliar os indivíduos, determinar os casais, efetuar a reprodução através do *crossover* e definir os indivíduos mais aptos, gerando uma nova população. Esse processo é repetido em forma de *loop*, aplicando-se algum tipo de critério de parada (LINDEN, 2008).

Na geração de uma população inicial, ou primeira população pai, deve-se definir o tamanho desejável da população a ser analisada, onde cada indivíduo representa uma possível solução do problema a ser resolvido e, de modo análogo à genética, cada um deve possuir um conjunto de cromossomos, gerados aleatoriamente, que representam as características e parâmetros dessa solução, como por exemplo, os coeficientes de um PID.

O processo de avaliação deve ser aplicado a cada indivíduo gerado na população inicial ou gerado durante o processo de reprodução. A avaliação se assemelha ao fator ambiente no processo de seleção natural. Ela representa a função ou sistema em que o indivíduo será inserido, resultando em um valor de avaliação, que identifica o quanto aquele indivíduo é apto ou quão apropriada é a solução que ele representa (LINDEN, 2008).

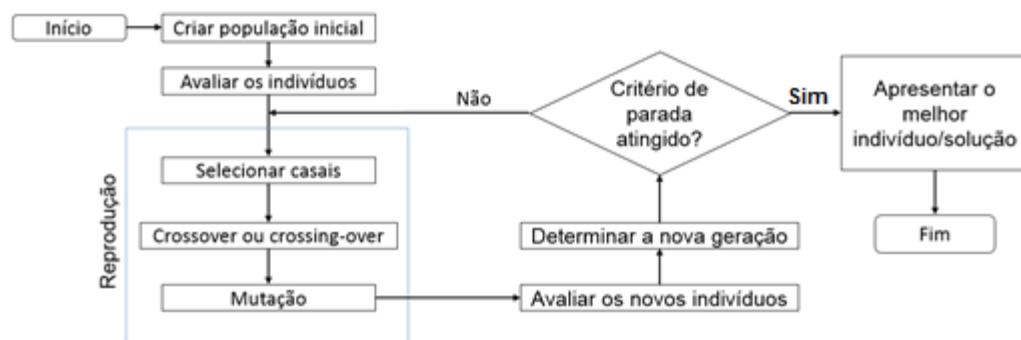
Para efetuar o processo de reprodução, é necessário definir quais indivíduos irão reproduzir entre si com o objetivo de gerar novos indivíduos. Este processo pode ser feito de várias maneiras, sendo elas puramente aleatórias ou parcialmente aleatórias, podendo-se usar os resultados encontrados na etapa de avaliação para dar alguma vantagem aos indivíduos mais aptos, assim como na natureza, que em muitos casos, os machos mais adaptados acabam se reproduzindo.

O processo de reprodução ocorre através do *crossover* entre os cromossomos dos indivíduos selecionados para a reprodução, passando assim o material genético adiante. Normalmente, cada casal de indivíduos pais gera um casal de indivíduos

filhos, os quais também devem passar pela etapa de avaliação. Outro fator importante nesta etapa é a mutação, onde, de modo também aleatório, cada indivíduo pode ter um ou mais de seus genes modificados, ou seja, não assumindo puramente o material genético dos indivíduos pais (LINDEN, 2008). Por fim, são analisadas a população de pais e de filhos, mantendo-se os indivíduos mais aptos e descartando-se os menos aptos, obtendo assim uma nova população pai.

Esses processos devem ocorrer em modo de *loop* até que se atinja um critério de parada, que pode ser tanto um número x de iterações ou quanto for obtido em um indivíduo o resultado esperado. A Figura 4 a seguir mostra um fluxograma com os passos de um Algoritmo Genético.

Figura 4: Fluxograma de um Algoritmo Genético



Fonte: o autor (2016)

Neste projeto, os indivíduos representarão as possíveis combinações de soluções para os coeficientes do PID (K_p , K_i e K_d), que serão inseridas como genes nos cromossomos desses indivíduos. Cada indivíduo será avaliado através de testes que contabilizarão o tempo gasto em uma volta, esperando, como resultado final, um indivíduo cujas características possibilitem que o carro complete o trajeto de forma mais estável e no menor tempo possível.

2.7. Resumo

Neste tópico, foi apresentada uma descrição sobre os principais componentes utilizados neste projeto, mostrando em alguns casos, seu princípio de funcionamento ou sua função. Conceitos sobre PID e Algoritmos Genéticos também foram apresentados, a fim de preparar uma base teórica sobre os próximos passos do projeto.

No tópico a seguir, serão apresentados os componentes utilizados e a forma na qual o projeto foi implementado.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O objetivo do projeto era obter um carro autônomo mais rápido e mais eficiente, de modo a concluir um trajeto no menor tempo possível. Para isso foram estudados vários métodos e formas de implementação, os mais eficientes serão apresentados nos itens a seguir.

3.1. Estrutura e Componentes

A estrutura e os componentes, bem como a forma que estes estariam dispostos, foram estudados de modo a minimizar as dimensões do veículo, mantendo o menor peso possível e respeitando o centro de gravidade para evitar problemas de instabilidade durante a variação da aceleração e nas curvas.

Realizou-se um estudo quanto às possibilidades disponíveis para a implementação do chassi do carro, chegando ao resultado que a utilização de uma placa de fenolite cobreada de dupla face seria a opção mais adequada, pois, devido ao peso e às dimensões reduzidas do veículo, a placa seria resistente o suficiente para suportar todos os componentes e funcionamento do carro, além disso, por ser cobreada em ambas as faces, ela permite que as trilhas de condução sejam feitas com o mínimo de pontos de cruzamento possível, reduzindo drasticamente o uso de *jumpers*. Assim sendo, ela foi utilizada tanto para a confecção da placa de circuito impresso quanto como chassi.

Adquiriu-se então uma placa cobreada de dupla face de 20x20 cm, sendo de tamanho mais que o suficiente para a implementação, sendo esta cortada de modo a obter o formato desejado.

Determinou-se que as rodas a serem utilizadas seriam semelhantes às utilizadas no robô Pololu 3pi, robô especialmente projetado para competições de robótica nas categorias *Follow Line* e *Maze Solving* (pololu, 2017). Dentre as opções, a que se demonstrou mais adequada foram as rodas de 32mm com pneu de borracha, pois além de apresentarem uma boa aderência com a pista, possibilitavam uma maior proximidade entre os sensores e a pista.

Além dos dois eixos de apoio compostos pelas duas rodas, inseriu-se um terceiro eixo, desta vez composto por uma esfera omnidirecional acompanhada de um suporte de deslizamento. A esfera foi fixada no plano inferior traseiro do carro, de modo a formar um triângulo com os outros dois eixos de apoio do carro, deixando-o alinhado e gerando uma maior estabilidade em conjunto com a disposição dos outros componentes na placa. O uso específico desta esfera ocorreu pelo fato de que ela desliza em seu suporte, apresentando um menor coeficiente de atrito, permitindo que o carro alcançasse maior velocidade.

Quanto aos motores, inicialmente foi planejado utilizar motores com caixa de redução 10:1 da linha micro metal Gearmotors, da Pololu. Entretanto, ao realizar testes com esses motores no veículo percebeu-se que eles não estavam suportando o carro, de modo que ele não conseguia andar em linha reta, foi encontrado um problema em um dos motores, que estava danificado e foi inutilizado. A solução encontrada para este problema foi utilizar motores com caixa de redução 30:1, também da linha micro metal Gearmotors, que possuem torque suficiente para suportar o peso do carro, além de possuir velocidade de 1000RPM (rotações por minuto).

Para proporcionar um controle bidirecional sobre o sentido de rotação dos motores, utilizou-se a ponte H L298N, com dimensões 43x43x27mm e com saídas suficientes para realizar um controle independente e de forma simples dos dois motores a serem utilizados no projeto. De acordo com seu *datasheet*, essa ponte H pode operar com faixa de tensão entre 4 e 35V.

Mediante a realização de pesquisas sobre os sensores a serem utilizados, determinou-se a utilização de 7 fotodetectores CNY70. Esses sensores são capazes de detectar a presença da faixa branca na pista preta, funcionalidade adequada aos objetivos do projeto. Eles foram dispostos de maneira simétrica no plano inferior frontal do carro, sendo que, seguindo os cálculos das dimensões dos componentes que iriam interferir na distância entre o sensor e a pista, foi possível mantê-lo dentro do distanciamento esperado, que é de 3mm. Além disto é importante frisar que os sensores foram dispostos na placa formando um arco, semelhante à disposição encontrada no Pololu 3pi. Esta configuração aumenta a eficiência do veículo, tornando as leituras obtidas mais confiáveis.

Ao se analisar os microcontroladores disponíveis, determinou-se o uso do Arduino NANO, que se trata de uma plataforma de computação física com base no

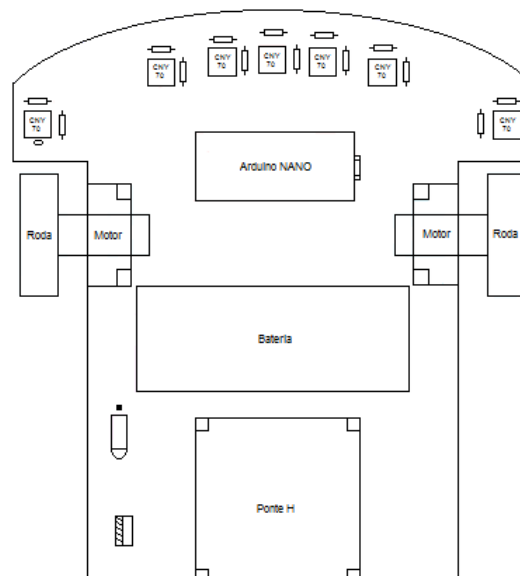
ATmega328P, contendo *hardware* e *software* (arduino, 2016). Este microcontrolador apresentou o melhor custo benefício em relação aos outros, possuindo mais portas analógicas e digitais que o necessário, além de ser mais leve e de dimensões mais reduzidas, permitindo assim também a redução das dimensões e peso do carro.

Para a alimentação do sistema utilizou-se uma bateria Lipo Zippy Compact de 11,1v com capacidade de 1000mah, sendo capaz de fornecer a corrente requisitada por cada um dos componentes. Essa bateria foi responsável pela maior parte do peso do veículo. Assim sendo, para uma melhor disposição do centro de gravidade do carro, a bateria foi disposta de maneira simétrica na placa, sendo fixada abaixo dos eixos dos motores e acima do ponto do suporte feito pela esfera omnidirecional.

Porém, alguns componentes, como o microcontrolador e os sensores, necessitavam de um valor de tensão menor do que o oferecido pela bateria. Para suprir essa necessidade, foi utilizado um regulador de tensão LM 7805, onde ao entrar com os 11,1v da bateria, é fornecido o valor de tensão de 5v na saída do regulador.

Com todos os componentes definidos, foi feito um esboço da placa e de como todos os componentes estariam dispostos nela, de modo a facilitar a compreensão quanto à formação das trilhas e gerando uma visualização prévia de como o carro ficaria. O esboço feito é representado pela Figura 5.

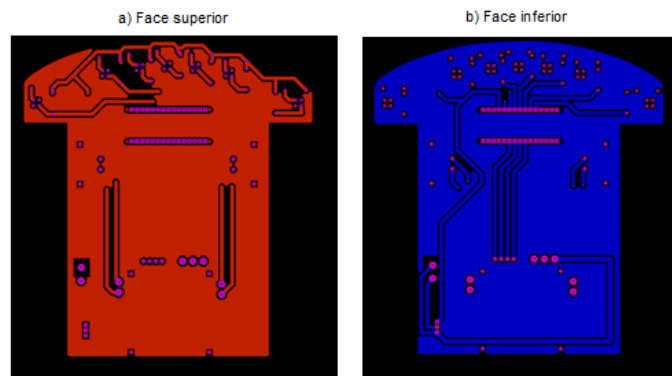
Figura 5: Esquema da estrutura e disposição dos componentes no carro



Fonte: (HANDAN, AMARAL e MASSON, 2016)

Para gerar a placa de circuito impresso, foi feito o esquema das trilhas e componentes utilizando o software Proteus, ferramenta que simplifica o design de placas ajudando a projetar e testar o layout de uma placa (labcenter, 2017). Como foi utilizada uma placa de fenolite cobreada de dupla face, foram geradas duas imagens, uma com as trilhas da face superior e outra com as trilhas da face inferior, como mostrado pela Figura 6 (a) e (b).

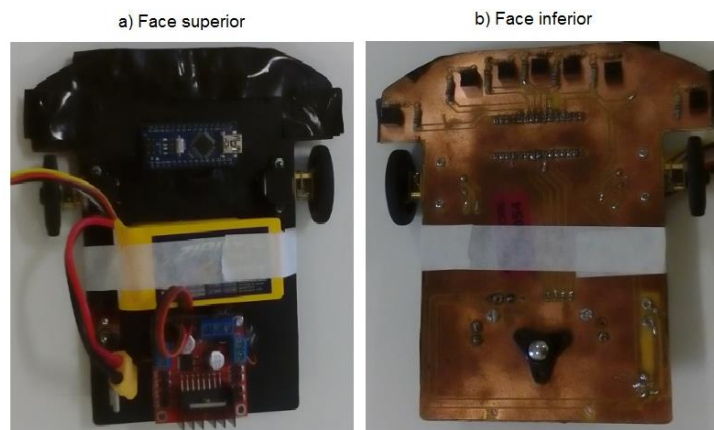
Figura 6: Faces da placa de circuito impresso



Fonte: (HANDAN, AMARAL e MASSON, 2016)

No processo de montagem da placa, gerou-se as imagens das trilhas, sendo estas gravadas sobre as duas faces da placa, e a seguir, foi realizada a corrosão. Por fim, cada um dos componentes foram soldados de maneira adequada na placa, finalizando assim a construção da parte de *hardware* do carro autônomo seguidor de linha. A Figura 7 apresentada a seguir mostra a face superior e a face inferior do carro já finalizado.

Figura 7: O carro autônomo seguidor de linha finalizado



Fonte: o autor (2016)

O próximo subitem é destinado para apresentar informações quanto à parte de *software* programação inserida no microcontrolador do carro.

3.2. Programação

Para a programação do carro, utilizou-se o IDE Arduino versão 1.6.9, que é o próprio ambiente de programação do Arduino. A programação foi feita em C com a utilização de bibliotecas especiais, como é o caso da QTRSensors (pololu, 2017), biblioteca utilizada pela Pololu.

A QTRSensors facilita a programação dos carros seguidores de linha, pois ela permite que seja feita a calibração dos sensores, onde a função `calibrate()` lê os valores mínimos e os máximos obtidos em cada sensor, armazenando-os a fim de fazer esta calibração. Neste projeto, essa função foi utilizada para a calibração dos 5 sensores centrais, sendo que os outros dois sensores externos são utilizados apenas para identificação de marcas na pista, tais como proximidade de curvas e critério de parada.

Feita a calibração, a biblioteca permite o uso da função `readLine()`, que, através de um cálculo de média ponderada, identifica a posição em que os sensores se encontram com relação à linha, permitindo assim que o microcontrolador estime a orientação do carro e determine as ações para corrigi-la caso necessário. O valor obtido através dessa função fica entre 0 e 4000, caso a leitura seja 2000, significa que o carro está na posição desejada, ou seja, centralizado com a linha. Porém, se o valor estiver entre 0 e 1999 ou entre 2001 e 4000, significa, respectivamente, que a pista está à esquerda ou à direita do ponto de centralização do carro, de modo que o microcontrolador deve realizar a correção dessa orientação. Com o intuito de suavizar as leituras, aplica-se um cálculo de média sobre as últimas 6 leituras, a fim de suavizar a influência de possíveis ruídos oriundos dos sensores. Por fim, subtrai-se 2000 dessa média, sendo considerado este resultado para determinar a posição real do carro.

A fim de melhorar a reação do carro e aumentar a sua estabilidade, utilizou-se um código de PID baseado no utilizado no código do Conde Duckula, carro seguidor de linha para competições criado anteriormente pela equipe de robótica da UFU de

Patos de Minas, chamada P.TELECO. Porém os ganhos K_p , K_i e K_d foram adaptados ao veículo e ao parâmetro de velocidade determinado.

O código orienta o microcontrolador na forma em que ele deve tratar o resultado obtido através do PID, determinando como ele deve atuar sobre o sinal PWM de cada motor, através da interface com a ponte H, reduzindo ou aumentando a largura de pulso de cada motor individualmente, fazendo que o carro vire para um lado ou para o outro. Assim, o carro é capaz de corrigir sua orientação e fazer as curvas.

Seguindo as regras da competição, adicionou-se um critério de parada para o carro, onde é utilizada a leitura analógica do sensor adicionado em sua extremidade direita. Quando o sensor detecta uma marcação na pista, o código identifica o início ou o fim do trajeto. Assim, quando é identificado o fim da pista, o microcontrolador espera 0.5 segundos e inibe o funcionamento dos motores, forçando assim a parada do carro.

3.3. Implementação do Algoritmo Genético

Como já foi dito anteriormente, o segundo objetivo deste projeto foi a implementação de um AG para realizar um ajuste fino nos coeficientes do PID do carro, a fim de otimizar seu desempenho na pista, tornando-o mais estável e rápido. A codificação deste AG foi feita utilizando o Code::Blocks, que é um IDE gratuito para desenvolvimento códigos em linguagem C, C++ e Fortran (codeblocks, 2015).

Neste AG, cada indivíduo representa uma combinação com os valores dos ganhos proporcional, integral e derivativo que devem ser usados como parâmetro no PID do carro. Cada um desses ganhos é representado em cada indivíduo como um cromossomo de 8 genes, cada gene é representado com uma estrutura binária, tendo como valor 0 ou 1, como pode ser visto Figura 8 a seguir.

Figura 8: Estrutura dos cromossomos e genes binários de um indivíduo

Indivíduo								
K_p	0	1	0	0	1	1	0	1
K_i	0	0	1	0	1	0	1	0
K_d	1	0	1	1	1	0	0	0

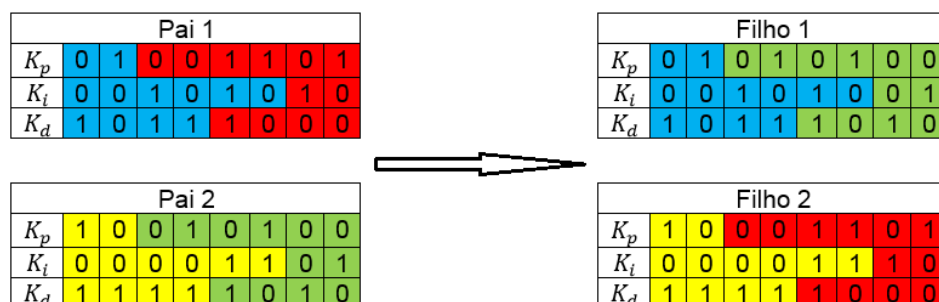
Fonte: o autor (2017)

Seguindo o que é mostrado na *Figura 4*, o primeiro passo deste AG é a criação de sua população inicial, neste momento cada indivíduo desta população é criado, de modo que o valor binário presente em cada um de seus genes é gerado de modo aleatório. Estes indivíduos são então avaliados de acordo com a função de avaliação.

A função de avaliação deste AG em específico é representada por duas etapas, primeiramente cada cromossomo é transformado em um valor que representa um dos ganhos, e então esses ganhos são aplicados no PID no código do carro. Feito isso o carro é testado na pista e o tempo gasto para ele terminar o trajeto é cronometrado e o tempo obtido é a avaliação daquele indivíduo. Neste caso, quanto menor for o tempo gasto, melhor é a avaliação do indivíduo. Deve se levar em consideração que no código do carro a velocidade máxima foi fixada em 140 (pode variar de 0 a 255) para todos os indivíduos, ou seja, foi aplicado apenas 54,9% do valor máximo do sinal PWM nos motores do carro, independentemente do PID de cada indivíduo, garantindo assim a igualdade de condições para os indivíduos durante as avaliações.

A próxima etapa do AG é o processo de reprodução, onde primeiramente são sorteados os casais de acordo com sua avaliação, ou seja, quanto mais bem avaliado maior é a chance de um indivíduo ser sorteado. Neste AG são sorteados três indivíduos, de modo que apenas os dois mais bem avaliados dentre estes são utilizados para gerar um par de filhos. Estes filhos herdam o material genético dos pais através do processo de *crossover*. Nesta etapa, há o sorteio de um ponto de corte aleatório para cada cromossomo, e assim o material genético é passado de maneira cruzada dos pais para os filhos. A Figura 9 a seguir representa a geração de dois novos indivíduos através da reprodução de um casal de pais, considerando que para o *crossover* os pontos de corte foram 2, 6 e 4 para os ganhos proporcional, integral e derivativo respectivamente.

Figura 9: Processo de *crossover* com pontos de cortes respectivamente 2,6 e 4



Fonte: o autor (2017)

Outra etapa do processo de reprodução é a mutação, nesta etapa cada filho possui a chance de ter alguns de seus genes modificados. Caso ocorra a mutação em um determinado gene, o valor daquele gene é invertido, ou seja, se seu valor era 0 ele passa a ser 1 e vice-versa. Neste AG há a chance de que cada cromossomo tenha 1 de seus genes seja modificado aleatoriamente. Primeiramente o fator de mutação utilizado foi de 10%, mas a partir da quinta geração foi aumentado para 25%, a razão desta modificação será melhor explicada no Tópico 4.

Ao final do processo de reprodução é obtida uma população de indivíduos filhos de igual tamanho à população de indivíduos pais. Cada um dos filhos passa pelo processo de avaliação, de modo que cada um obtém um valor de acordo com o tempo gasto pelo carro para completar a volta.

A próxima etapa deste AG é seleção dos indivíduos, nesta etapa os melhores indivíduos da população de pais e da população de filhos são selecionados para compor a nova população de pais com o mesmo tamanho da população de pais anterior. Esse método de reinserção é chamado de “Melhores pais e filhos”.

Estes processos ocorrem em *loop* até que se atinja o critério de parada, que neste projeto foi de 10 gerações, sendo que ao fim, o melhor indivíduo é apresentado juntamente com suas características.

3.4. Resumo

Apresentou-se neste tópico, os componentes utilizados neste projeto, assim como a forma que eles foram definidos e implementados, mostrando que foi utilizado a própria placa de circuito impresso como estrutura do veículo, onde foram adicionados os motores com as rodas, os sensores, a ponte H, a bateria, o regulador de tensão e o microcontrolador.

Também foi abordado o ambiente de programação, as técnicas e as funções presentes no código, que orientam o microcontrolador quanto a forma de tratar os sinais recebidos pelos sensores e o modo como definir o PWM, para atuar, em conjunto com a ponte H, sobre os motores. Por fim foi explicada a implementação do AG criado para este projeto, mostrando as etapas e processos do código.

No tópico a seguir, serão apresentados os resultados obtidos e a conclusão.

4. RESULTADOS OBTIDOS E CONCLUSÃO

O carro autônomo seguidor de linha foi levado para participar da 12ª edição do Winter Challenge, que contou com cerca de 900 participantes e 500 robôs competindo. Nosso carro competiu na categoria *Follow Line* contra aproximadamente 79 carros, onde foi posto à prova em baterias de três voltas cada, ocorridas em três dos quatro dias de evento. Alguns parâmetros em seu código foram alterados de um dia para o outro, obtendo assim diferentes tempos de conclusão de volta. Neste evento, os valores do PID foram ajustados pelos especialistas, em testes empíricos.

A Tabela 1 indica os ganhos proporcional, integrativo e derivativo utilizados no PID, além da velocidade usada e o tempo gasto para conclusão do percurso em cada dia.

Tabela 1: Valores de PID e velocidade utilizados no carro e o menor tempo obtido para cada dia de competição

	2º dia (09/07/2016)	3º dia (10/07/2016)	4º dia (11/07/2016)
K_p	$1/30$	$1/30$	$1/30$
K_i	$1/10000$	$1/10000$	$1/10000$
K_d	$9/2$	$7/2$	$7/2$
Velocidade	230	240	250
Tempo (s)	27,25	26,76	Nenhuma volta concluída

Fonte: o autor (2016)

Como pode ser visto na Tabela 1, foi obtida uma redução de 0,49s entre o primeiro e o segundo dia. Isto se deu principalmente pelo aumento da velocidade do carro, pois os ajustes nos ganhos do PID foram feitos mediante um valor inicial e vários testes para encontrar um valor eficaz que tornasse o carro o mais estável e veloz possível. Infelizmente, com o aumento da velocidade do carro para o terceiro dia, nenhuma volta foi completada, isso ocorreu pois não foi possível realizar novos testes para adaptar o PID a essa nova velocidade.

Todo o processo de aprovação do projeto no edital, planejamento, montagem e implementação do carro durou cerca de dois anos. Foi uma tarefa árdua, mas recompensadora, os resultados obtidos foram animadores e superaram as expectativas, pois foi possível completar o percurso em tempo relativamente pequeno e alcançar assim a classificação de 12º lugar geral da América Latina e 9º lugar geral do Brasil, sendo que, considerando apenas os carros construídos pelas próprias equipes, chamados de chassi-próprio, foi alcançado o 5º lugar da América Latina e o 2º do Brasil.

O período de idealização e implementação do AG se iniciou após a participação na competição. Durante a aplicação do AG foi possível fazer algumas observações bastante interessantes.

A fim de realizar as comparações e verificar a eficiência do AG, o carro foi testado na pista usando os mesmos parâmetros do PID utilizados no segundo e terceiro dia de competição no Winter Challenge, que já haviam sido otimizados manualmente por especialistas. No teste o carro gastou 14.190 milissegundos para completar o trajeto, este é o tempo que será utilizado para as comparações com os resultados obtidos com o ajuste fino realizado pelo AG neste trabalho.

Primeiramente o AG foi executado com os seguintes parâmetros:

- População de 20 indivíduos;
- Taxa de mutação de 10%;
- Critério de parada de 10 gerações.

Já na segunda geração, foi obtido um indivíduo que conseguiu completar o trajeto em 13.484 milissegundos, 706 milissegundos a menos que o tempo de comparação, que representa uma melhora de 4,97%.

Com o passar das gerações, foi percebido que o AG não estava mais convergindo, o que indicava a possibilidade de estagnação em um mínimo local. Para tentar driblar este problema, a partir da quinta geração a taxa de mutação foi aumentada para 25%.

Deste modo, foi possível perceber uma pequena melhora já na sétima geração, onde foi obtido um indivíduo que completou o trajeto em 13.477 milissegundos. Foi um avanço relativamente pequeno, mas já demonstrou que o AG voltou a convergir.

Por fim, na oitava geração já foi obtido o melhor resultado das dez gerações, o melhor indivíduo foi capaz de completar o trajeto em 13.380 milissegundos, 810 milissegundos, representando que o ajuste fino realizado pelo AG obteve uma

eficiência 5,71% maior que o a do PID obtido através do ajuste realizado por nossa equipe.

Com a intenção de analisar se o AG poderia gerar um resultado ainda melhor que o já obtido, ele foi executado novamente nas mesmas condições anteriores, porem desta vez utilizando uma população de tamanho 30. Porém, ao passar as dez primeiras gerações, o melhor indivíduo obtido completou o trajeto em 13.517 milissegundos, que curiosamente embora que ainda seja melhor que o tempo de comparação, foi pior que o melhor tempo obtido com o AG anterior.

Este resultado pode ser explicado pelo fato de que o AG é uma ferramenta de otimização que se utiliza de sorteios aleatórios, deste modo, não há garantia que os indivíduos encontrados anteriormente ou que indivíduos melhores seriam obtidos apenas por aumentar o tamanho da população, desde que não seja setada nenhuma semente randômica.

Assim sendo, o melhor indivíduo encontrado apresentou como valores para os ganhos proporcional, integral e derivativo do PID respectivamente os valores de $1/30,282$, $1/18000$ e 1,775. De modo que ao aplicar estes valores como parâmetros do PID no código do carro, o trajeto foi completado em 13380 milissegundos, apresentando uma melhora de 5,71% no desempenho do carro quando comparado ao PID utilizado na competição representando pelos ganhos de $1/30$, $1/10000$ e $7/2$, com o qual o trajeto havia sido completado em 14190 milissegundos.

Os resultados obtidos com este projeto foram realmente animadores, podendo através deles verificar de forma prática a eficiência de um AG quando aplicado para definir os parâmetros de funcionamento de um sistema mecânico e eletrônico, abrindo assim as portas para uma gama de possibilidades de aplicação.

5. REFERÊNCIAS

- ARDUINO. **arduino**, 1 nov. 2016. Disponível em: <<https://www.arduino.cc/en/Main/ArduinoBoardUno>>. Acesso em: 05 nov. 2016.
- ATHOSELECTRONICS. **athoselectronics**, 2016. Disponível em: <<http://athoselectronics.com/ponte-h/>>. Acesso em: 05 nov. 2016.
- BEKEY, G. A. **Autonomous Robots: From Biological Inspiration to Implementation and Control**. Cambridge: The Mit Press, 2005.
- BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos Eletrônicos e teoria de circuitos**. 8. ed. São Paulo: Pearson, 2004.
- CODEBLOCKS. **codeblocks**, 2015. Disponível em: <<http://www.codeblocks.org/>>. Acesso em: 29 jun. 2017.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. **Sistemas de Controle Modernos**. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.
- GOLDBERG, D. E. **Genetics Algorithms: in Search, Optimizacion e Machine Learning**. Tuscaloosa: Addison-Wesley Publishing Company, 1989.
- GONÇALVES, L. F. S. **Desenvolvimento de Sistema de Navegação Autônoma por GNSS**. EPUSP. São Paulo. 2011.
- HANDAN, A. D. B. M.; AMARAL, L. R. D.; MASSON, M. T. Projeto e Desenvolvimento de Carro Autônomo Seguidor de Linha. **II Simpósio de Tecnologia e Ciência**, Patos de Minas, 2016.
- KOSOW, I. L. **Máquinas Elétricas e Transformadores**. Porto Alegre: Globo, v. 1, 1982.
- LABCENTER. **labcenter**, 2017. Disponível em: <<https://www.labcenter.com/>>. Acesso em: 29 jun. 2017.
- LINDEN, R. **Algoritmos Genéticos: Uma importante ferramenta da Inteligência Computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro: BRASPORT, 2008.
- MALVINO, A. P. **Eletrônica**. 4. ed. São Paulo: Makron Books, v. 1, 1995.
- OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 1. ed. Rio de Janeiro: Prentice Hall Brasil, 1982.
- PEREIRA, F. **Microcontroladores PIC: Técnicas Avançadas**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2002.
- PEREIRA, F. D. A. **Microcontroladores PIC e Linguagem C**. [S.l.].

POLOLU. **pololu**, 2017. Disponível em: <<https://www.pololu.com/product/975>>.

Acesso em: 29 jun. 2017.

POLOLU. **pololu**, 2017. Disponível em: <<https://www.pololu.com/docs/0J19/all>>.

Acesso em: 29 jun. 2017.

SILVA, C. E.; SILVA, V. V. R.; BACCARINI, L. M. R. Controlador PID Sintonizado por Algoritmo Genético Guiado por Otimização Colaborativa. **XX Congresso Brasileiro de Automática**, Belo Horizonte, 20 set. 2014.

SWIECH, M. C. S.; OROSKI, E.; ARRUDA, L. V. R. Sintonia de Controladores PID em Colinas de Destilação Através de Algoritmos Genéticos. **3º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo e Gás**, Salvador, 2 outubro 2005.