



Universidade Federal de Santa Catarina
Centro Tecnológico
Departamento de Engenharia Elétrica
Eletrônica Aplicada - EEL7300

Laboratório de Eletrônica Aplicada EEL7300

Projeto: Robô Seguidor de Linha

Aluno: Daniel Spillere Andrade - 07241080 - daniel@danielandrade.net

Professor: Sidnei Noceti Filho

Co-orientador: Maicon D. Pereira

Florianópolis - 2013

Conteúdo

1	Descrição do Projeto	3
2	Introdução	4
3	Descrição do Projeto	6
3.1	Objetivo Geral	6
3.2	Objetivos Específicos	6
4	Revisão Bibliográfica	7
4.1	Divisor de tensão	7
4.2	Sensor LDR	7
4.3	Transistor como chave	8
4.4	Amplificador Operacional funcionando como comparador	9
4.5	Motor de Corrente Contínua	10
4.5.1	Excitação série	11
4.5.2	Excitação paralelo	11
4.5.3	Excitação independente	11
4.6	Veículos Guiados Automaticamente	12
5	Estudo geral do funcionamento do circuito	13
5.1	Captação de sinal (Sensoriamento)	13
5.2	Processamento do sinal	14
5.3	Movimentação do robô	14
6	Implementação	15
6.1	Simulação	15
6.2	Fonte de Alimentação	17
6.3	Sensores	18
6.4	Amplificador Operacional	18
6.5	Transistor	18
6.6	Desenvolvimento da Placa de Circuito Impresso	19
6.6.1	Versão 1.0	19
6.6.2	Versão 2.0	21
7	Não idealidades do amplificador operacional	22
8	Resultados Finais	23
9	Sugestão para trabalhos futuros	26
10	Conclusões	27
11	Referências Bibliográficas	28
12	Anexos	29
12.1	Datasheet do LM358	29

Lista de Figuras

1	Robô Japonês Karakuri.	4
2	Cena da peça teatral R.U.R. onde foi apresentado pela primeira vez o termo Robô . . .	4
3	Exemplo de um robô AGV em um galpão ou depósito.	5
4	Exemplo de circuito divisor de tensão.	7
5	Símbolo utilizado para referenciar um LDR em um projeto eletrônico.	7
6	Em (a) uma imagem de um LDR, e em (b) uma foto real de LDRs de diversos tamanhos.	8
7	Transistor NPN que servirá como chave.	8
8	Circuito básico para a utilização de um transistor NPN e o gráfico da curva I_C por V_{CE} .	9
9	AmpOp em malha aberta operando como comparador.	10
10	Funcionamento do motor de corrente contínua.	11
11	Exemplo de um AGV em um ambiente portuário.	12
12	Exemplo de um AGV transportante objetos dentro de uma fábrica.	12
13	Diagrama de blocos do circuito a ser implementado.	13
14	Foto da estrutura em que o circuito será montado.	14
15	Circuito montado e pronto para ser simulado no software Proteus ISIS.	15
16	Simulação para quando o robô estiver andando em linha reta.	16
17	Simulação para quando o robô estiver com apenas um motor ligado.	16
18	Demonstração do funcionamento dos sensores.	17
19	Amplificador Operacional LM358.	18
20	Transistor NPN BC547.	18
21	Imagem do esquemático desenvolvido no software EagleCad.	19
22	Imagem da placa de circuito impresso desenvolvida no software EagleCad.	20
23	Simulação 3D da placa de circuito impresso com os componentes soldados.	20
24	Placa de circuito impresso após a corrosão em (a) e (b), em (c) a placa após ter os componentes soldados.	21
25	Placa de circuito impresso montada e junto com os sensores LDR e LED.	21
26	Placa de circuito impresso montada e junto com os sensores LDR e LED.	22
27	Li-Poly, 11.1v (3s) 2200mAh 1.5C fornecida pela HobbyKing.	23
28	AGV Montado versão final, visão frontal.	24
29	AGV Montado versão final, visão lateral.	24
30	AGV Montado versão final, visão superior.	25

Lista de Tabelas

1	Resultados da Simulação	17
2	Lista de Materiais	25

1 Descrição do Projeto

O projeto proposto para a aula de laboratório da disciplina de Eletrônica Aplicada (**EEL7300**) foi projetar, simular e desenvolver um robô de locomoção autônomo que possa, sem a utilização da eletrônica digital, percorrer uma trajetória determinada, onde no presente caso, o robô seguirá uma linha da cor preta em um fundo branco. O projeto consiste de um sistema de emissão e detecção da luz refletida no solo e, a partir da intensidade do sinal captado, realizar o controle de dois motores de corrente contínua através de um circuito composto basicamente por amplificadores operacionais, transistores e resistores.

2 Introdução

A idealização dos robôs descende de tempos antigos. Relatos históricos apresentam a construção de instrumentos autônomos desde o início da civilização grega, quando eram utilizados sistemas de pesos e bombas pneumáticas para a construção de equipamentos sem necessidade prática ou econômica. No Japão, a robótica teve início de uma maneira um pouco diferente da dos gregos, onde as primeiras aparições de robôs se deu na forma de 'Mágicos' Automatas ou em japonês **Karakuri**, que são bonecos com movimentos programados através de engrenagens, onde seus construtores eram considerados como um tipo de mágicos, pois conseguiam fazer com que objetos inanimados tomassem vida. Um exemplo deste tipo de robô pode ser visto na Figura 1.



Figura 1: Robô Japonês Karakuri.

O grande estopim para o desenvolvimento das máquinas autônomas se deu com a Primeira Revolução Industrial, quando foram desenvolvidos e aperfeiçoados dispositivos automáticos capazes de manipular peças, permitindo a automatização da produção e com isso, a diminuição do preço dos produtos, que até então eram totalmente manufaturados.

Apesar desta evolução do meio industrial, a palavra robô foi utilizada pela primeira vez apenas em 1922 na peça de teatro **R.U.R.** (Rossum's Universal Robots) criada pelo checoslovaco **Karel Capek**, sendo originada da palavra checa *robot* que significa trabalho forçado.

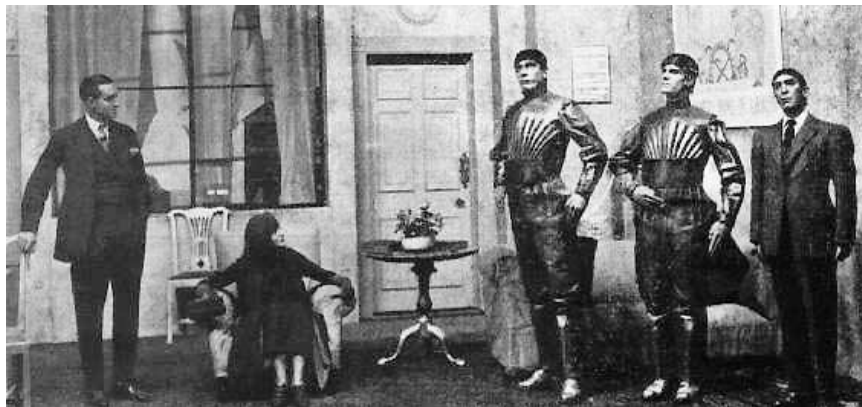


Figura 2: Cena da peça teatral R.U.R. onde foi apresentado pela primeira vez o termo **Robô**.

As primeiras máquinas automatizadas foram os teares mecânicos das indústrias têxteis, o que permitiu a produção em massa de tecidos e uma grande melhora na qualidade do produto final. A partir de então, com o desenvolvimento de novas tecnologias e a crescente necessidade imposta pelo mercado, as máquinas automáticas vem se expandindo desde então com o objetivo de desenvolver sistemas de produção cada vez mais eficazes e baratos.

Um veículo guiado automaticamente (AGV - *Automated Guided Vehicle*) é um robô móvel com uma série de sensores e circuitos de comunicação que o tornam autônomo, ou seja, capaz de executar sua tarefa independente, sem a supervisão humana.

Sistemas baseados em AGVs podem ser utilizados para varias finalidades, tanto na execução de tarefas industriais quanto domésticas. Estes sistemas são mais utilizados em depósitos e plantas industriais, mas podem ser encontrados em sistemas para transporte de cargas, como em portos, ou mesmo no transporte pessoal.

Atualmente, nas plantas industriais, é comum a utilização de sistemas que utilizam algum tipo de guia para o deslocamento dos robôs pelo chão-de-fábrica, como canaletas, fitas refletoras nas paredes, e fitas magnéticas ou coloridas no piso. Um exemplo de um AGV em utilização é mostrado na Figura 3.

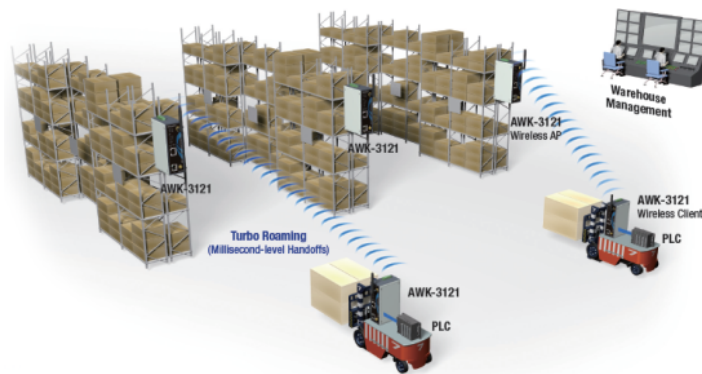


Figura 3: Exemplo de um robô AGV em um galpão ou depósito.

3 Descrição do Projeto

Este projeto propõe a implementação de um sistema utilizando eletrônica analógica, para o deslocamento de robôs AGVs guiados por sensores que detectam uma faixa de cor.

3.1 Objetivo Geral

Desenvolver um robô capaz de se movimentar através de uma trajetória plana demarcada por uma faixa escura envolta por um meio claro através de sensores compostos por diodos emissores de luz infravermelha e foto transistores, motores CC e um circuito de controle analógico baseado em amplificadores operacionais.

3.2 Objetivos Específicos

- Entender o funcionamento dos sensores
- Projetar um circuito com amplificadores operacionais que atuam na função de comparação
- Dimensionar os componentes de forma a permitir o controle dos motores do robô
- Simular o circuito para provar funcionalidade do projeto
- Implementar o circuito do robô seguidor de faixa em placa de circuito impresso

4 Revisão Bibliográfica

Com o intuito de obter-se um melhor entendimento dos componentes e procedimentos realizados neste trabalho, segue abaixo uma rápida revisão bibliográfica dos principais temas e conceitos teóricos necessários para o entendimento do projeto.

4.1 Divisor de tensão

O divisor de tensão é uma técnica de projeto utilizada para criar uma tensão elétrica (V_{out}) que seja proporcional à outra tensão (V_{in}).

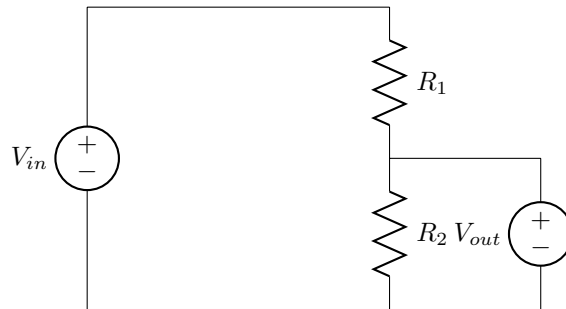


Figura 4: Exemplo de circuito divisor de tensão.

Podemos demonstrar o funcionamento de um divisor de tensão utilizando o circuito da Figura 4, onde temos dois resistores, R_1 e R_2 . A tensão V_{out} que queremos calcular será a tensão em cima do resistor R_2 , como mostra na equação 1.

$$V_{out} = \frac{R_2 * V_{in}}{R_1 + R_2} \quad (1)$$

4.2 Sensor LDR

LDR (do inglês *Light Dependent Resistor*), em português Resistor Dependente de Luz ou Fotoreistência, é um componente eletrônico passivo do tipo resistor variável, mais especificamente, é um resistor cuja resistência varia conforme a intensidade da luz que incide sobre ele. À medida que a intensidade da luz aumenta, a sua resistência diminui.

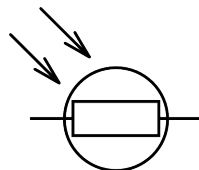


Figura 5: Símbolo utilizado para referenciar um LDR em um projeto eletrônico.

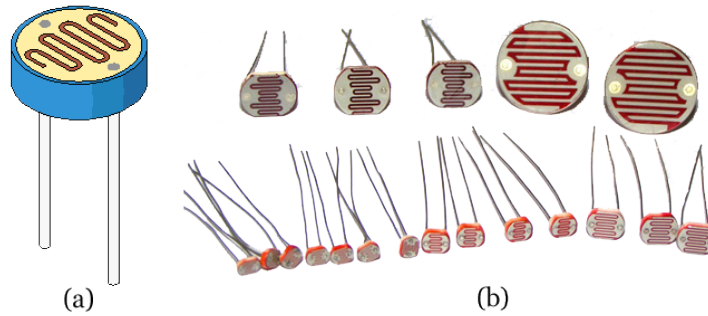


Figura 6: Em (a) uma imagem de um LDR, e em (b) uma foto real de LDRs de diversos tamanhos.

4.3 Transistor como chave

O transistor é um componente eletrônico que começou a popularizar-se na década de 1950, tendo sido o principal responsável pela revolução da eletrônica na década de 1960. São utilizados principalmente como amplificadores e interruptores de sinais elétricos. O termo provém do inglês transfer resistor (resistor/resistência de transferência), como era conhecido pelos seus inventores.

No atual projeto, utilizaremos um transistor NPN para controlar o acionamento de cada Motor CC, onde o transformador funcionará como uma chave, onde quando fechada o motor irá se movimentar, caso aberta o motor irá simplesmente desligar.

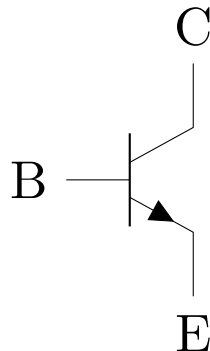


Figura 7: Transistor NPN que servirá como chave.

Um transistor pode operar como chave eletrônica, bastando para tal polarizá-lo de forma conveniente: corte ou saturação.

Quando um transistor está saturado opera como um curto (chave fechada) entre o coletor e o emissor de forma que $V_{ce} \approx 0V$ e quando está no corte, opera como um circuito aberto (chave aberta) entre o coletor e o emissor, de forma que $V_{ce} \approx V_{cc}$.

No ponto de saturação (chave fechada) a corrente de base é alta (I_{Bsat}) e no ponto de corte (chave aberta) a corrente de base é zero.

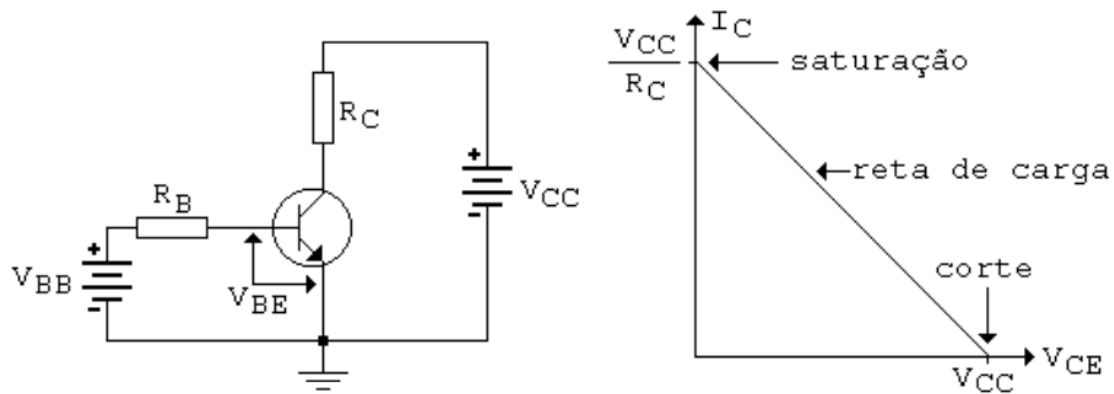


Figura 8: Circuito básico para a utilização de um transistor NPN e o gráfico da curva I_C por V_{CE} .

Para obter o extremo superior da reta de carga (corrente I_C) devemos supor um curto entre coletor e emissor ($V_{CE} = 0$), de forma que toda a tensão de alimentação se fixe no resistor de coletor.

$$\text{Teremos então: } I_C = \frac{V_{CC}}{R_C}$$

Para obter o extremo inferior da reta de carga, devemos supor os terminais de coletor e emissor abertos.

$$\text{Teremos então: } V_{CE} = V_{CC}$$

Fica então caracterizado que o transistor opera apenas em um dos extremos da reta de carga: corte ou saturação

4.4 Ampolificador Operacional funcionando como comparador

Freqüentemente precisamos comparar as tensões de entrada para verificar qual delas é a maior. Tudo o que precisamos é uma resposta sim ou não. Um comparador é um circuito com duas tensões de entrada (não inversora e inversora) e uma tensão de saída.

A maioria dos circuitos comparadores são construídos por ampops na configuração de malha aberta ou às vezes tendo sua tensão de saída limitada por diodo zener. Na maioria dos casos o diodo zener também é utilizado como tensão de referencia.

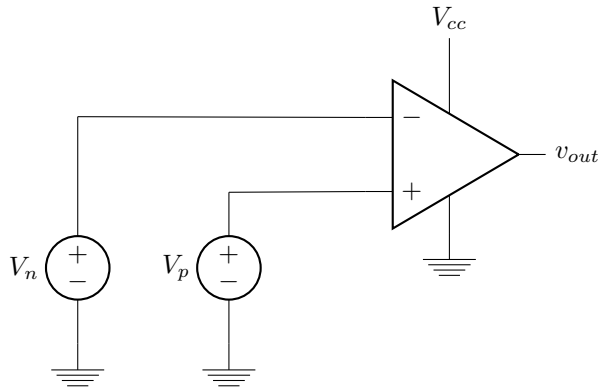


Figura 9: AmpOp em malha aberta operando como comparador.

Neste projeto utilizamos o ampop na configuração de malha aberta, onde o tensão de saída V_{out} será dada pela expressão 2.

$$V_{out} = A_0(V_p - V_n) \quad (2)$$

Como o ganho em malha aberta (A_0) do amplificador operacional **LM358** é 100.000, então se a tensão na entrada for $V_p > V_n$ a saída estará saturada e a tensão de saída será próxima à da alimentação do ampop. Caso $V_n > V_p$, na presente configuração, a saída do mesmo será simplesmente a alimentação negativa do amplificador, ou seja, zero volts.

4.5 Motor de Corrente Contínua

Uma máquina de corrente contínua pode funcionar como motor (convertendo energia elétrica em mecânica) ou como gerador (convertendo energia mecânica em elétrica). Ela possui um enrolamento de campo localizado no estator e um enrolamento de armadura no rotor. Ambos os enrolamentos são alimentados com corrente contínua. O rotor é a parte girante da máquina, localizado sobre o eixo da mesma e constituído de um material ferromagnético envolto pelo enrolamento de armadura. O estator é a parte estática da máquina, também constituído de material ferromagnético, localizado em torno do rotor e envolto pelo enrolamento de campo. Um anel comutador é responsável pela inversão adequada do sentido das correntes que circulam no enrolamento de armadura e é localizado junto ao eixo da máquina, girando com a mesma.

No caso dos motores, uma tensão elétrica é aplicada nos terminais do enrolamento de armadura através do anel comutador, fazendo com que circule uma corrente elétrica nesse enrolamento, produzindo, assim, um campo magnético e pares de pólos (norte e sul) no rotor. Aplicando uma tensão nos terminais do enrolamento de campo, há uma intensificação do campo magnético através do corpo do estator, produzindo pares de pólos magnéticos pelo mesmo. A interação entre os campos magnéticos de armadura no rotor e do campo no estator faz com que os mesmos tentem se alinhar, um pólo norte de um campo tentará se aproximar de um pólo sul do outro. Caso os campos magnéticos não estejam alinhados, surgirá um par de forças que produzirá um torque no eixo fazendo com que o mesmo gire. Assim, o anel comutador, que está localizado no eixo da máquina, também gira, mudando o sentido da tensão aplicada nas bobinas, o que inverte o sentido das correntes e, conseqüentemente, o sentido do campo magnético. Com isso, há novamente a produção de um binário de forças que mantém o movimento do eixo. A Figura 10 abaixo demonstra as etapas do funcionamento do motor cc.

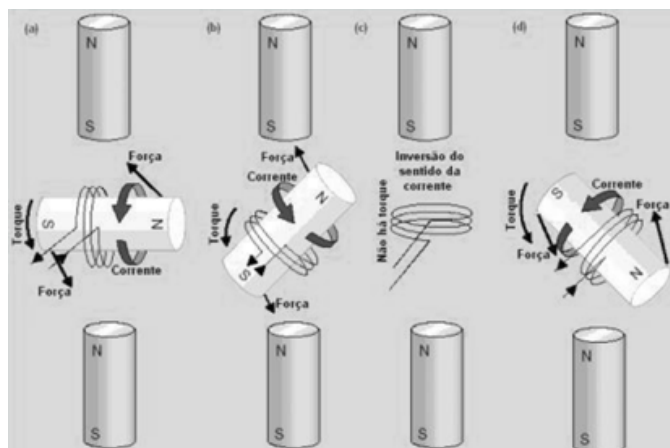


Figura 10: Funcionamento do motor de corrente contínua.

Existem diversos tipos de motor CC de acordo com a quantidade de fontes CC usadas e da forma como os enrolamentos de campo e de armadura são conectados. Se for utilizada somente uma fonte CC, então os enrolamentos de campo e de armadura devem ser ligados em série (dando origem ao motor CC série) ou em paralelo (dando origem ao motor CC em derivação). Por outro lado, se forem utilizadas duas fontes CC independentes, então tem-se um motor CC com excitação independente. Cada um desses tipos de motor CC apresenta desempenho um pouco diferente em termos de curva de torque ou velocidade em função da corrente de armadura e, por isso, tem distinta aplicação.

4.5.1 Excitação série

O enrolamento de campo está em série com o enrolamento de armadura, proporcionando fluxo no entreferro da máquina somente quando a corrente de armadura for diferente de zero. Produz um conjugado elevado em baixa rotação e potência constante. Com a excitação em série, quando o motor é descarregado, desenvolve-se uma velocidade extremamente elevada e, por isso, este método de excitação não é recomendado para transmissões por meio de polias e correias. É recomendado em aplicações que exigem elevada tração, como no caso do acionamento de veículos rodoviários e metroviários.

4.5.2 Excitação paralelo

No motor com excitação em paralelo (ou *shunt* ou derivação) o conjunto das bobinas de campo fica em paralelo com o enrolamento da armadura e são feitas com um grande número de espiras de fio fino pois a corrente elevada necessária na condição de plena carga circula através do enrolamento de armadura. Este motor tem uma velocidade praticamente constante, mesmo com ampla variação de carga.

4.5.3 Excitação independente

Neste caso, o motor é excitado externamente pelo circuito de campo. É indicado para tarefas que necessitem de um controle preciso da velocidade do eixo com a máquina sob carga variável. A excitação independente pode ser empregada no controle de velocidade de processos industriais em que uma banda muito larga de velocidade é requerida.

4.6 Veículos Guiados Automaticamente

Os veículos guiados automaticamente (ou AGVs - *Automated Guided Vehicle*) são máquinas autônomas que não necessitam de condutor humano e que são capazes de se deslocar em trajetos predefinidos. Desenvolvidos para receber e executar instruções, seguir um caminho, carregar e distribuir materiais, esses veículos têm como vantagens a capacidade de se adequarem a áreas apertadas, dividirem os corredores com pessoas e empilhadeiras e se adaptarem a mudanças de trajeto. Além disso, são flexíveis, demandam pouca manutenção e possuem capacidade de carga bastante variável. Suas aplicações mais comuns são em transporte de materiais para linhas de produção, galpões e em portos. Exemplos de AGVs podem ser vistos nas Figuras 11 e 12.



Figura 11: Exemplo de um AGV em um ambiente portuário.



Figura 12: Exemplo de um AGV transportante objetos dentro de uma fábrica.

5 Estudo geral do funcionamento do circuito

Dos vários métodos de controle de veículos autônomos por referência, o mais simples e barato de ser implementado em um chão de fábrica é o seguidor de faixa. Este método tem por base identificar uma faixa de cor diferente em relação ao restante do ambiente de movimentação do robô, por meio de sensoriamento óptico. Este sistema de sensoriamento pode ser realizado com o uso de câmeras ou por sensores fotoelétricos. O uso de câmeras exige processamento digital, que além de caro, foge do escopo deste trabalho. Portanto o método de sensoriamento a ser empregado será através de sensores fotoelétricos utilizando LEDs (*Light Emitting Diode*) e LDRs (*Light Dependent Resistor*).

O circuito de controle do robô seguidor de faixa tem como base um par de sensores como é mostrado no diagrama de blocos abaixo. Estes sensores ficam espaçados de forma que a faixa de contraste da superfície a ser seguida fique entre eles. O par de sensores é conectado a um sistema analógico de controle com a função de tratar o sinal enviado pelos sensores. A saída deste bloco controla os dois motores, sendo, cada um deles, responsável pela tração de uma das rodas do robô de forma independente. Quando um dos sensores atinge a faixa de contraste, o sensor detecta uma mudança na quantidade de energia captada, o que permite a correção da trajetória para manter a faixa de contraste entre o par de sensores. O diagrama de blocos do circuito pode ser observado na Figura 13.

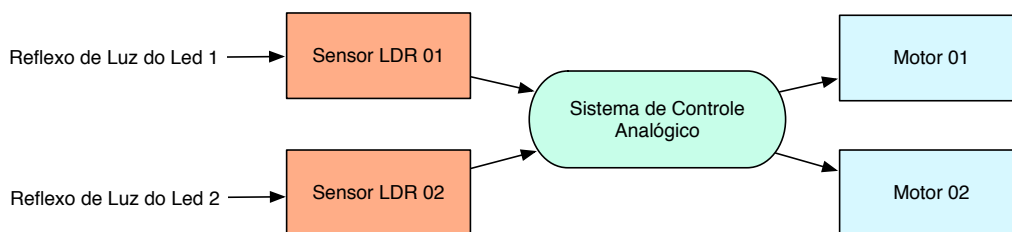


Figura 13: Diagrama de blocos do circuito a ser implementado.

5.1 Captação de sinal (Sensoriamento)

O robô proposto por este trabalho é guiado através da navegação por referência óptica. Assim, utiliza-se um par de sensores fotoelétricos que operam em modo de reflexão, cada um em uma extremidade do robô, de maneira que a faixa de contraste de cor, que demarca o trajeto, permaneça entre eles.

Cada sensor é constituído por um LED vermelho de alto brilho, que emite um feixe de luz sobre a superfície, e um LDR para captação da energia refletida. O LDR funciona como uma resistência variável, e o circuito montado ao seu redor desenvolve um divisor de tensão, onde a tensão em cima do LDR irá variar se o mesmo encontra-se em cima ou do lado da linha de caminho. O divisor de tensão de cada sensor, ao invés de utilizar simplesmente dois resistores, utiliza um potenciômetro e um LDR, pois é necessário calibrar o circuito para que quando os dois sensores estiverem em cima da mesma faixa de cor, todos componentes apresentem a mesma resistência ôhmica. Os sinais de tensão regulados são então transmitidos para o bloco comparador.

Inicialmente foi proposto o desenvolvimento de um projeto em que utilizaria quatro amplificadores operacionais, sendo dois para gerar uma onda triangular e dois para o controle dos motores, que funcionariam como comparadores, e assim podendo controlar a velocidade de cada motor utilizando uma técnica chamada PWM (do inglês *Pulse Width Modulation*). Entretanto, devido à uma dificuldade de se obter uma onda triangular perfeita, o que aumentaria demasiadamente a complexidade e o preço do circuito, foi então proposto um novo circuito com a utilização de apenas dois amplificadores operacionais, e com um controle onde o motor estaria ou ligado ou desligado.

5.2 Processamento do sinal

O sinal de saída dos sensores é comparado pelos amplificadores operacionais. Como o amplificador tem alimentação assimétrica devido a alimentação do circuito ser feita por baterias, o sinal de saída dos amplificadores operacionais só pode assumir valores de 0 à $+V_{cc}$.

A tensão de saída do **LDR01** é comparada ao sinal de saída do **LDR02**. No caso de um destes, que está conectado à entrada não inversora do AmpOp, apresentar um valor superior será obtido uma saída saturada com o valor da tensão de alimentação do componente ($+V_{cc}$), devido ao alto ganho de malha aberta ($A_0 = 100.00$). Caso contrário, o valor da tensão de saída será $-V_{cc}$, no caso, 0 volts.

5.3 Movimentação do robô

O sinal enviado pelo bloco comparador controla o acionamento dos motores do robô. Quando um dos LDRs apresentar maior resistência, ou seja, quando um dos sensores localiza-se sobre a faixa escura, a saída de um dos amplificadores operacionais permanece em 0V enquanto a saída do outro se encontra saturada em $+V_{cc}$. Desta maneira, o motor relacionado é desligado, permitindo que o outro motor continue em funcionamento, tornando o robô capaz de realizar uma curva de modo a reposicionar a faixa de trajetória entre os sensores.

Para que o veículo possa realizar esta manobra, os motores que serão posicionados de forma oposta, deverão ser polarizados de maneira distinta para que o sentido de rotação das rodas seja o mesmo. Como os motores elétricos possuem uma rotação elevada para este tipo de aplicação, deverá ser usado um motor com uma caixa de redução. Para este projeto, foi comprado um kit de robótica da empresa **HobbyKing** que contém a estrutura necessária para o atual projeto, dois motores de corrente contínua com uma caixa de redução, duas rodas e uma placa para que o circuito eletrônico possa ser montado. Uma imagem do kit esta presenta na Figura 14.

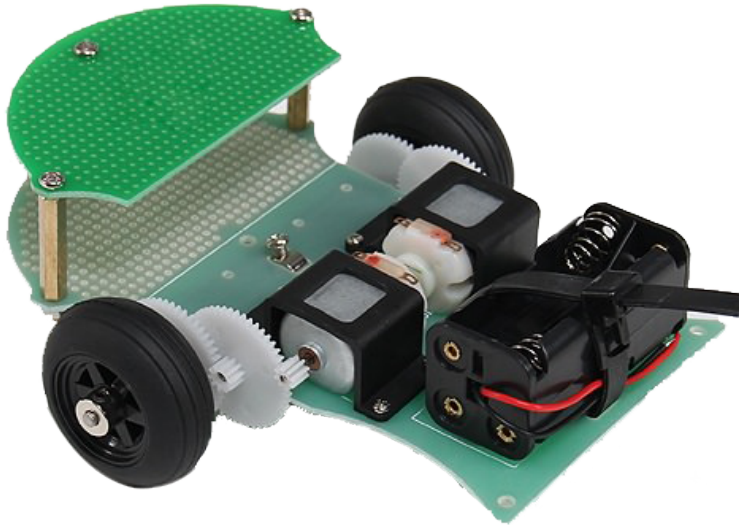


Figura 14: Foto da estrutura em que o circuito será montado.

6 Implementação

6.1 Simulação

Após a idéia do funcionamento do robô ter sido pensada, foi feito utilizando o software **Proteus ISIS** a simulação do mesmo. O circuito da Figura 15 demonstra o que foi simulado. Dentro do quadrado do **Sensor 01** encontra-se o primeiro divisor de tensão, onde **RLDR1** é o potenciômetro para a regulação da resistência entre os dois sensores, e **LDR1** é o sensor LDR. A tensão em cima do **LDR1** irá variar dependendo de quanto a superfície estiver refletindo as ondas luminosas do **LED1**, e esta mesma tensão irá fazer com que o amplificador operacional sature em $+V_{cc}$ ou em 0. O mesmo ocorre com a parte do **Sensor 02**.

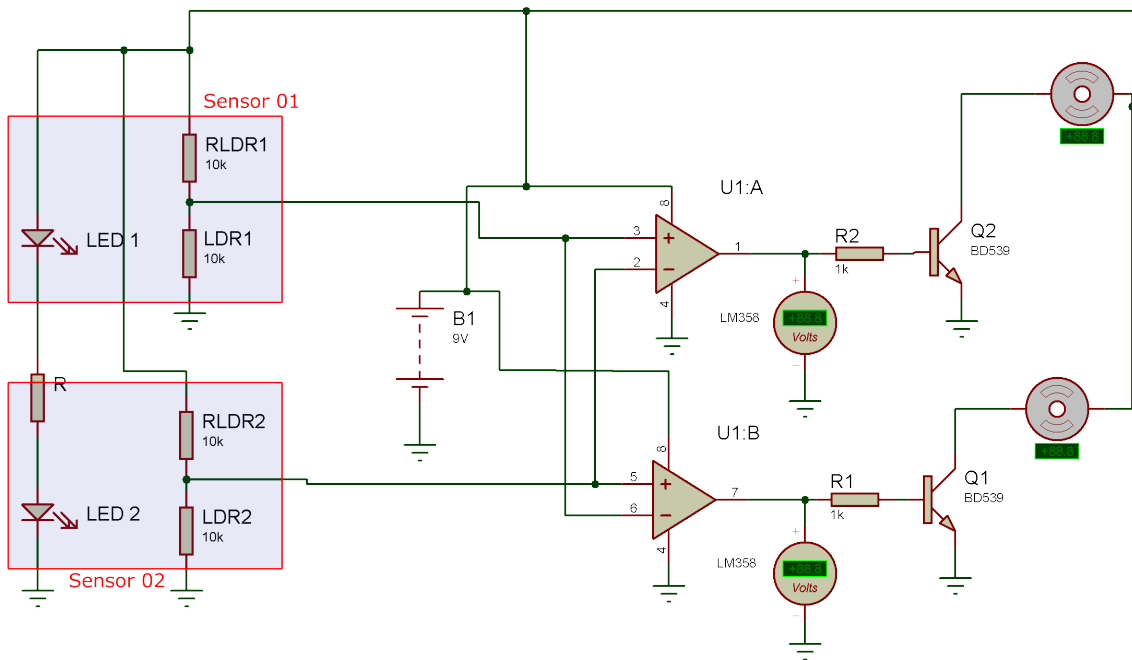


Figura 15: Circuito montado e pronto para ser simulado no software Proteus ISIS.

No caso da Figura 15 o circuito apresenta-se desligado, nenhuma tensão esta sendo transferida para os motores. Na Figura 16, quando o valor da resistência dos dois LDRs for a mesma, que ocorrerá quando os dois sensores estiverem sob a mesma cor e o robô estiver andando em linha reta.

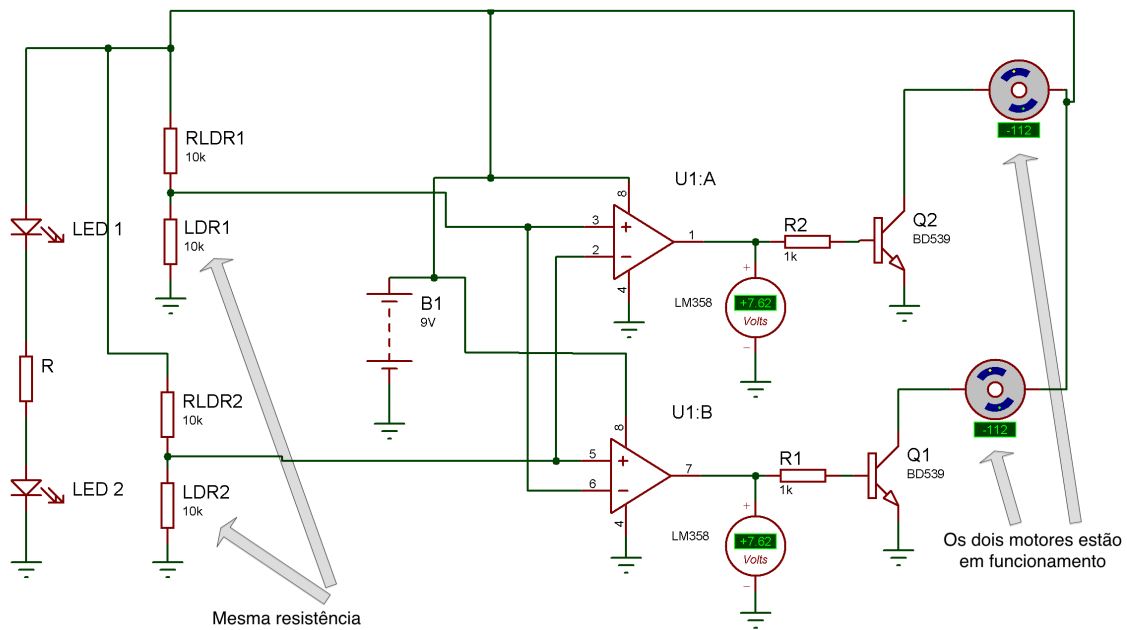


Figura 16: Simulação para quando o robô estiver andando em linha reta.

Na Figura 17 podemos perceber o que ocorrerá quando o robô estiver sobre uma curva, onde um dos sensores estará sobre a faixa de cor escura, o que fará que um dos dois motores desligue, fazendo que o robô corrija sua trajetória.

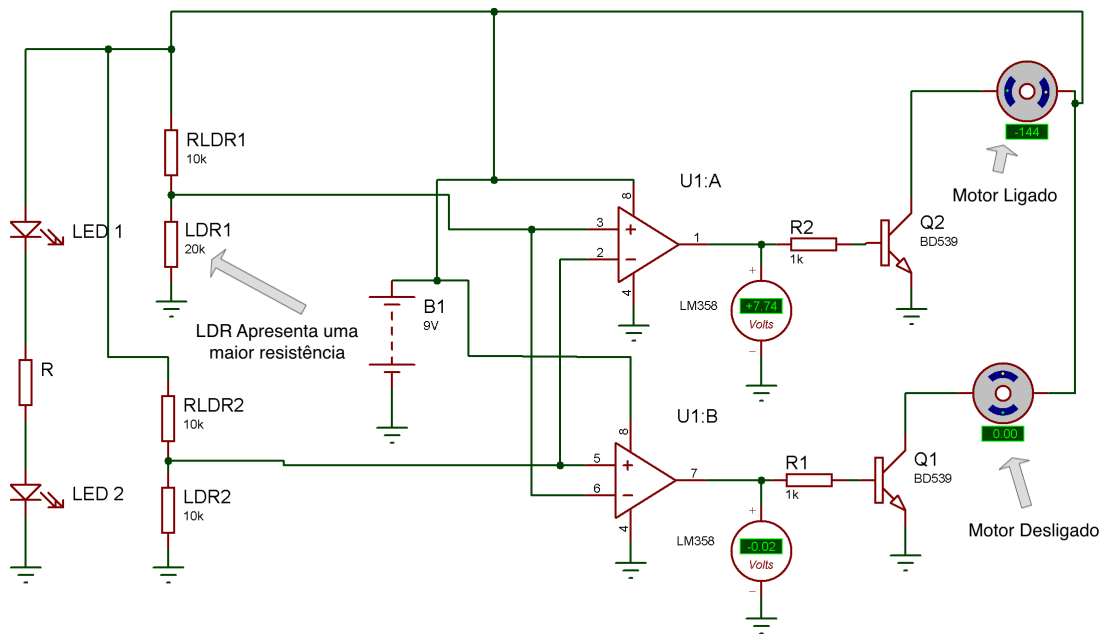


Figura 17: Simulação para quando o robô estiver com apenas um motor ligado.

Tabela 1: Resultados da Simulação

	Tensão Sensor 01	Tensão Sensor 02	Vout 01	Vout 02
Caso 01	Tensão DC Alta	Tensão DC Alta	+V _{cc}	+V _{cc}
Caso 02	Tensão DC Baixa	Tensão DC Alta	0	+V _{cc}
Caso 03	Tensão DC Alta	Tensão DC Baixa	+V _{cc}	0

O primeiro caso equivale aos dois sensores captando a mesma quantidade de luz deixando as saídas dos amplificadores operacionais em +V_{cc} chaveando os transistores e ligando os dois motores ao mesmo tempo, como mostrado na Figura 18 (a).

Os outros casos equivalem a apenas um dos sensores captando a luz refletida, deixando a saída de um dos amplificadores operacionais em +V_{cc} chaveando o transistor e ligando apenas um motor enquanto o outro motor permanece desligado, como é mostrado na Figura 18 (b).

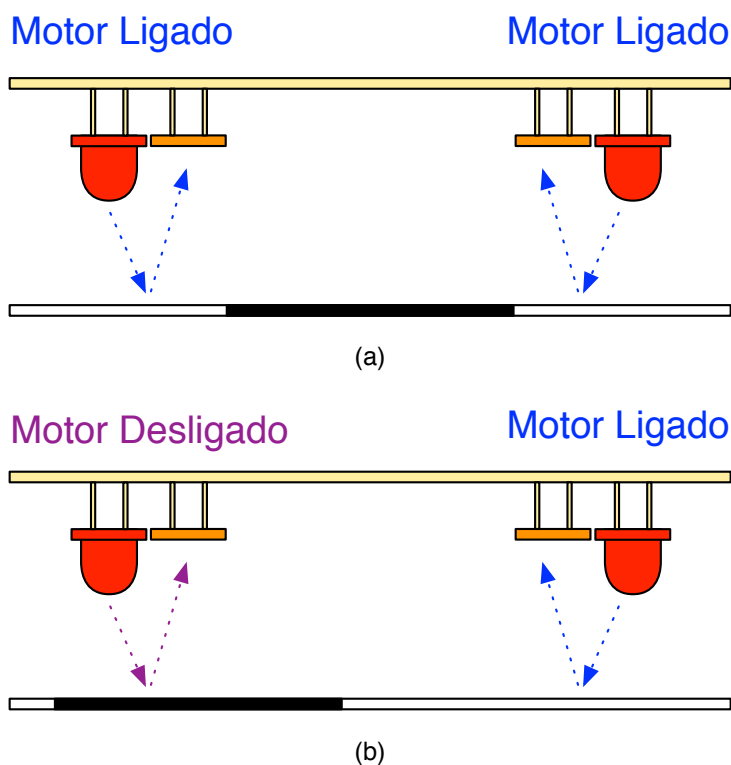


Figura 18: Demonstração do funcionamento dos sensores.

6.2 Fonte de Alimentação

Para conferir autonomia ao robô, optou-se por utilizar baterias. Pela simplicidade do circuito, a quantidade de componentes e a baixa potência utilizada no circuito como um todo, foi possível utilizar uma bateria alcalina comum de 9V.

6.3 Sensores

Apesar da existência de diversos sensores ópticos no mercado, pelo custo e disponibilidade optou-se por usar LEDs vermelhos de alto brilho e fotoresistores LDR separadamente, o que necessitou a utilização de potenciômetros auxiliares para calibrar a diferença de resistência dos LDRs.

6.4 Amplificador Operacional

O uso de uma fonte assimétrica de tensão contínua exige a utilização de circuitos integrados com alimentação assimétrica. O **LM358** mostrado na Figura 19, além da alimentação assimétrica possui dois amplificadores operacionais integrados no mesmo CI, sendo o mais apropriado para este projeto.

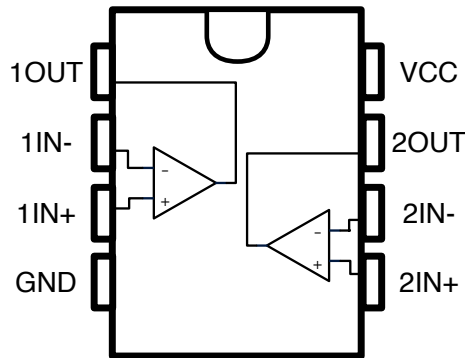


Figura 19: Amplificador Operacional LM358.

Como o amplificador operacional será utilizado como comparador, as características mais importantes são:

- **Alto ganho de tensão DC:** 100 dB;
- **Tensão de alimentação:** +3 V à +32 V;
- **Tensão de entrada :** -0,3 à +32 V;
- **Corrente máxima de saída:** 60 mA;

Mais informações sobre o LM358 podem ser encontradas no *datasheet* do mesmo, presente nos anexos.

6.5 Transistor

Como o amplificador operacional não tem capacidade de fornecimento de corrente suficiente para alimentar os motores, foram utilizados transistores NPN **BC547** que podem chavear correntes de até 100mA.

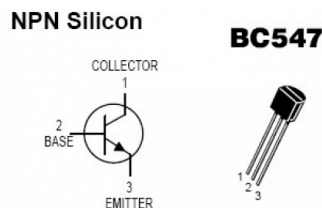


Figura 20: Transistor NPN BC547.

6.6 Desenvolvimento da Placa de Circuito Impresso

6.6.1 Versão 1.0

Após ter testado o funcionamento do projeto em uma *protoboard*, partiu-se então para a próxima etapa de desenvolvimento, que é a confecção da placa de circuito impresso, onde foi utilizado o software desenvolvido pela empresa **Cadsoft**, EagleCad.

O processo do desenvolvimento da placa de circuito impresso implica em três partes, a primeira é de desenvolver o esquemático do circuito, que é apresentado na Figura 21. O segundo passo é, a partir do esquemático, projetar a localização dos componentes e o caminho das trilhas de cobre por onde a corrente fluirá na placa. A placa desenvolvida para este projeto é mostrada na Figura 22.

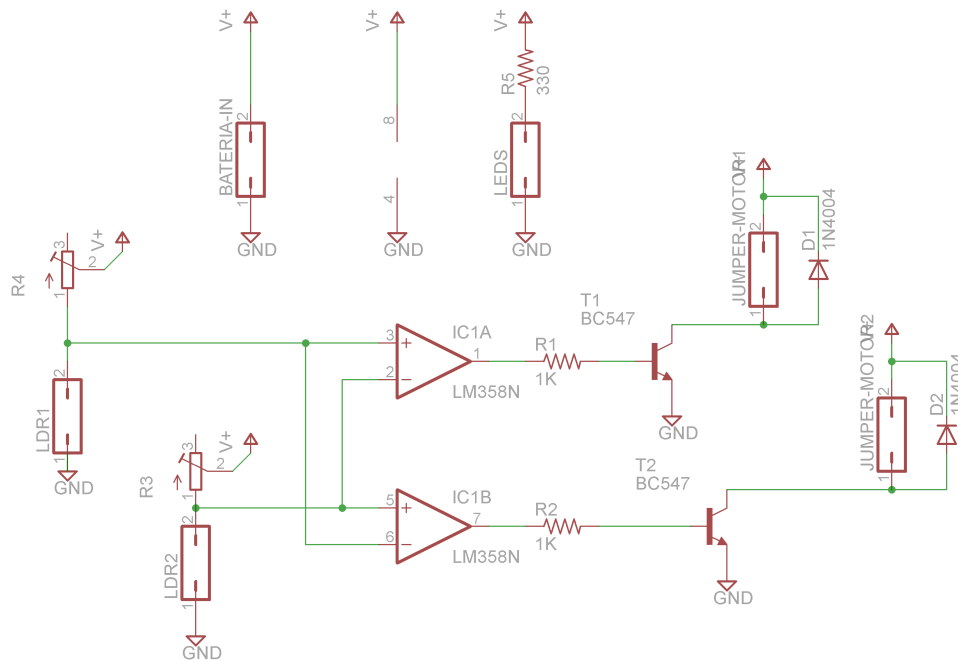


Figura 21: Imagem do esquemático desenvolvido no software EagleCad.

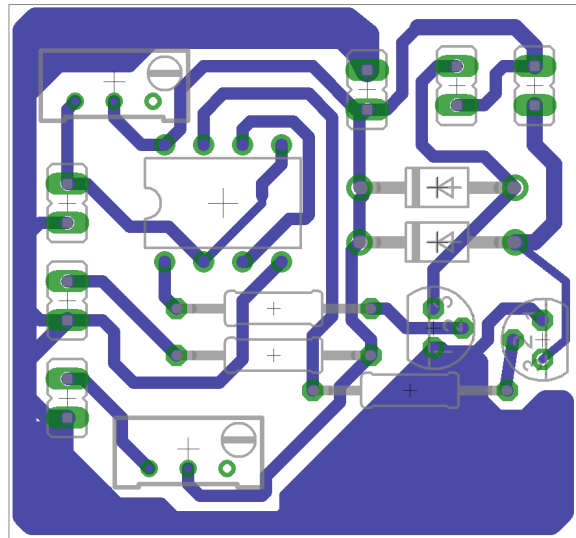


Figura 22: Imagem da placa de circuito impresso desenvolvida no software EagleCad.

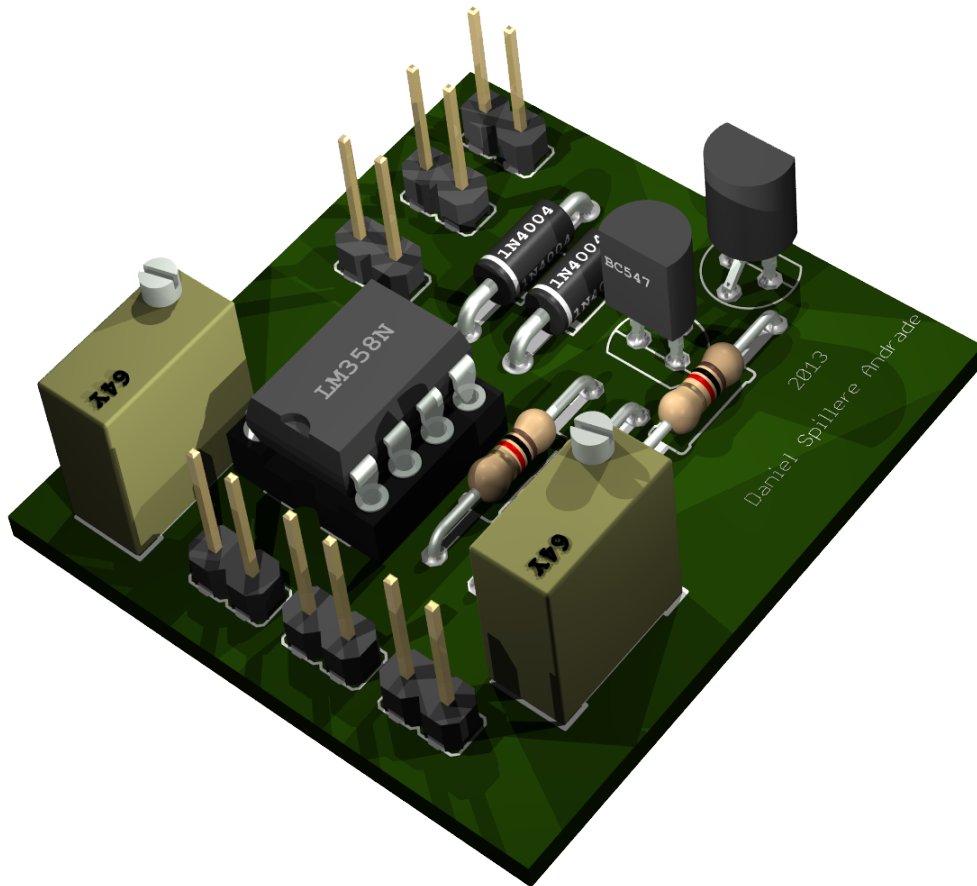


Figura 23: Simulação 3D da placa de circuito impresso com os componentes soldados.

Com a placa desenvolvida no EagleCad, o próximo passo é transferir o que foi projetado para um placa limpa de cobre. Existem muitas técnicas diferentes para a confecção da placa de circuito impresso, e no presente caso, foi escolhido o método caseiro mais comumente empregado que é utilizando Percloroeto de Ferro, ou Cloreto de Ferro III (FeCl_3) para corroer a placa de cobre. Antes de iniciar a corrosão da placa, as trilhas a serem impressas foram impressas em um papel de retroprojeter, e então com um ferro de passar roupa, transferidas para a placa de cobre, deixando a placa pronta para corrosão.

Com a placa de cobre pronta para corrosão, colocamos ela dentro de uma vasilha com o Percloroeto de Ferro e água, deixando em torno de uma hora, dependendo de quão "forte" está a solução, até que o cobre suma da placa onde as trilhas se apresentam.

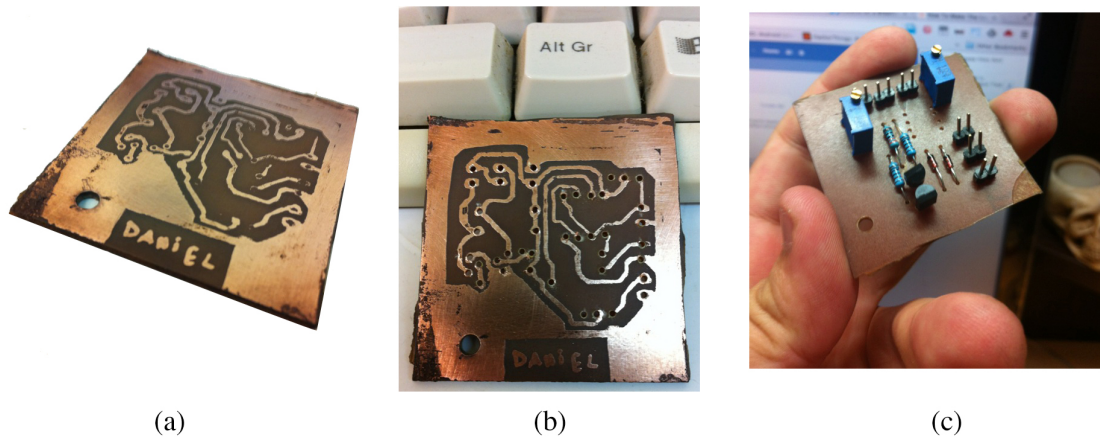


Figura 24: Placa de circuito impresso após a corrosão em (a) e (b), em (c) a placa após ter os componentes soldados.

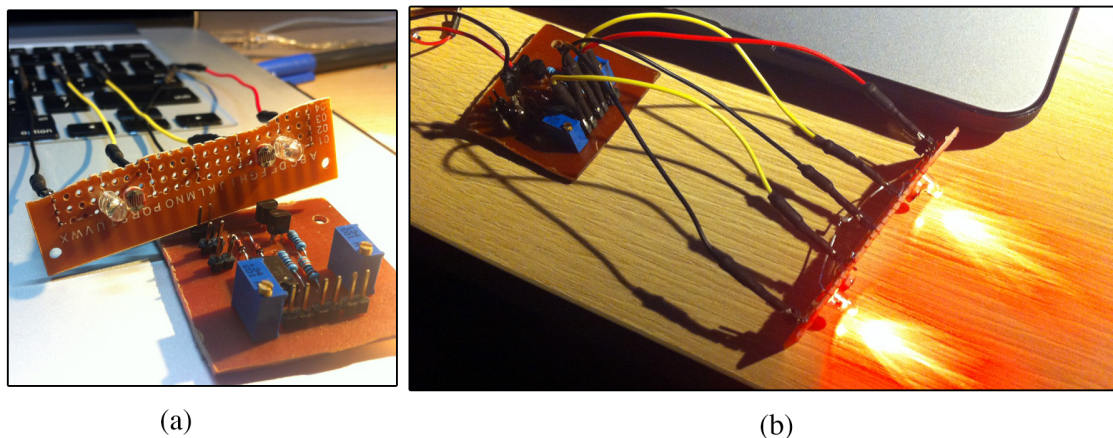


Figura 25: Placa de circuito impresso montada e junto com os sensores LDR e LED.

6.6.2 Versão 2.0

A primeira versão da PCB funcionou bem, porém o amplificador operacional sofreu algum dano durante os primeiros testes e teve que ser removido da placa (onde o AmpOp estava soldado direto

na placa, sem a utilização de socket). Ao tentar remover o componente, as trilhas na PCB foram danificadas, levando assim ao desenvolvimento de uma outra placa para que seja fresada no **INEP** (Instituto de Eletrônica de Potência). Essa nova placa teve que ser redesenhada para que atendesse as especificações da fresadora, com trilhas mais grossas e mais espaço entre os *pads*.

Abaixo estão duas novas versão projetadas do mesmo circuito, a Figura 26 (a) é a versão de duas camadas e (b) a versão de uma camada (que foi utilizada no projeto final).

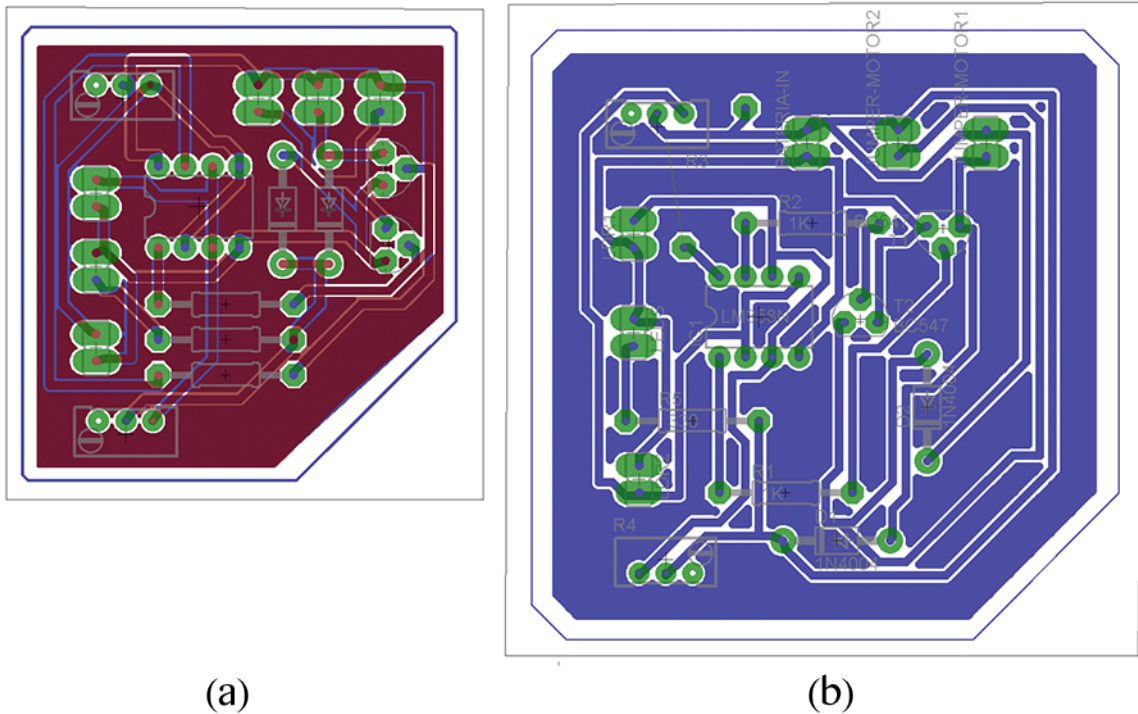


Figura 26: Placa de circuito impresso montada e junto com os sensores LDR e LED.

7 Não idealidades do amplificador operacional

Como este projeto utiliza dois amplificadores operacionais trabalhando como circuitos em malha aberta, qualquer diferença de tensão entre as entradas do ampop resultará em uma saturação $+V_{CC}$ ou $0V$, por isso uma compensação das não idealidades, principalmente a Tensão de Offset (V_{os}) é de extrema importância.

No caso do presente circuito, os potenciômetros inseridos no divisor de tensão servirá para calibrar o circuito e também anular as não idealidades do componente.

8 Resultados Finais

Este projeto levou algumas semanas para ser desenvolvido, porém o que mais atrasou o cronograma de desenvolvimento foi devido à demora em que o correio levou para entregar a base do carro, foram quase dois meses de espera. O projeto, placa de circuito impresso, simulações estavam todas prontas, só esperando a entrega do produto da **HobbyKing**.

Assim que foi finalmente entregue o componente final, iniciou-se a montagem e testes finais do projeto, onde algumas pequenas alterações foram necessárias para que o carro consiga seguir a linha sem nenhum problema.

O projeto inicial havia sido feito utilizando uma bateria de 9V, porém sua carga não duraria muito tempo com a alto consumo dos dois motores. Como solução para este problema, foi utilizado então uma bateria (também fornecida pela HobbyKing) de **Li-Poly, 11.1v (3s) 2200mAh 1.5C**, capaz de fornecer energia para o projeto por um longo período de tempo. A bateria é a mesma de Figura ??.



Figura 27: Li-Poly, 11.1v (3s) 2200mAh 1.5C fornecida pela HobbyKing.

Quando fizemos o primeiro teste utilizando a bateria de 11.1 volts, os motores funcionaram com uma velocidade demasiadamente grande, podendo danificar o mesmo e as engrenagens de redução, que são de plástico. Olhando nas especificações dos motores, foi constatado que sua tensão nominal é em torno de 3 volts, e utiliza-lo com uma tensão de 11.1 volts ia fundir o motor cedo ou tarde.

Para resolver este problema, foi utilizando um **Regulador de Tensão 7805** de 5 volts para alimentar todo o circuito. Algumas alterações foram necessárias, como a alteração da resistência dos LEDs. O amplificador operacional trabalha com tensões de 3 a 32 volts, então não teve nenhum problema em continuar utilizando o mesmo componente. A saída em malha aberta do amplificador ficou então em torno de 3 volts, já que a saída sempre terá uma queda se comparada à alimentação, por causa dos seus componentes internos.

Ao efetuar novamente os testes, foi notável a queda de velocidade do AGV, aumentando a sua estabilidade ao percorrer o trajeto determinado. Porém devido à sua caixa de redução, e velocidade ainda não era a ideal para que o carro consiga percorrer o caminho sem nenhuma complicação e instabilidade. Para este problema foi primeiramente utilizado dois potenciômetros, afim de reduzir a tensão em cima dos motores, fazendo com que eles andem mais devagar. Esta solução funcionou, porém a

resistência dos potenciômetros não eram estáveis e variavam com a passagem da corrente e a movimentação do carro. Com o valor da resistência encontrado, os potenciômetros foram substituídos por duas resistências de 10Ω , e assim conseguindo a velocidade ideal para garantir estabilidade ao circuito.

As Figuras 28, 29 e 30 mostram como ficou o projeto final do AGV.

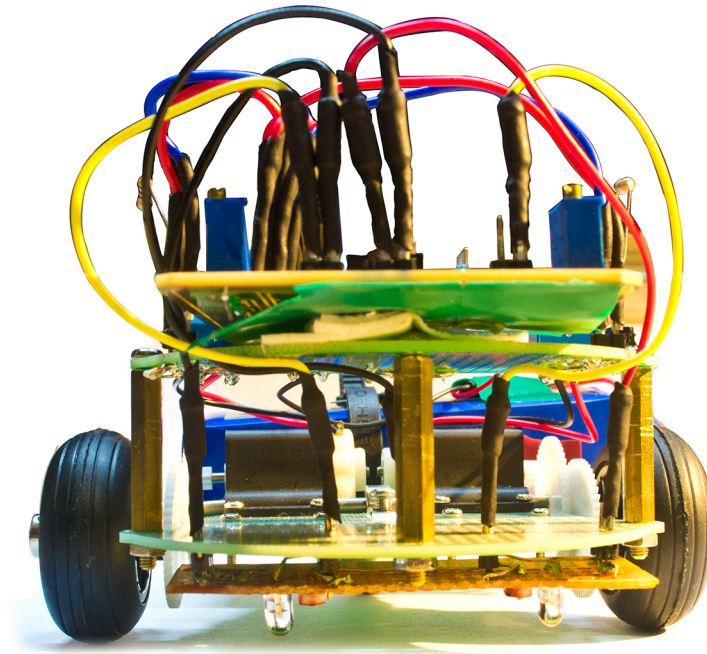


Figura 28: AGV Montado versão final, visão frontal.

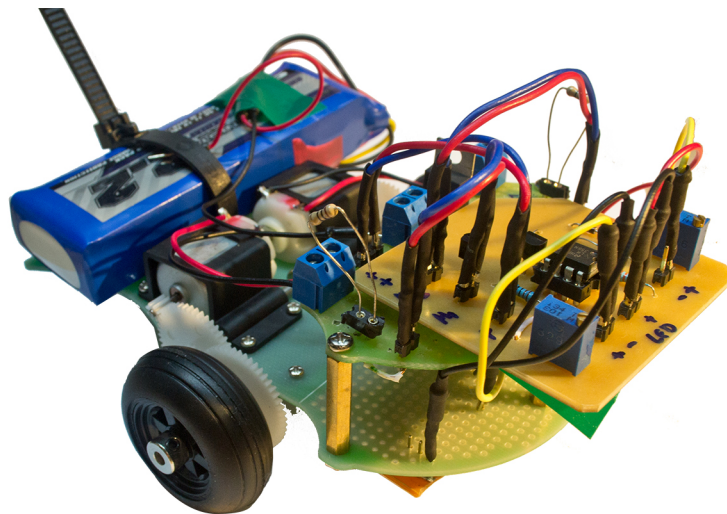


Figura 29: AGV Montado versão final, visão lateral.

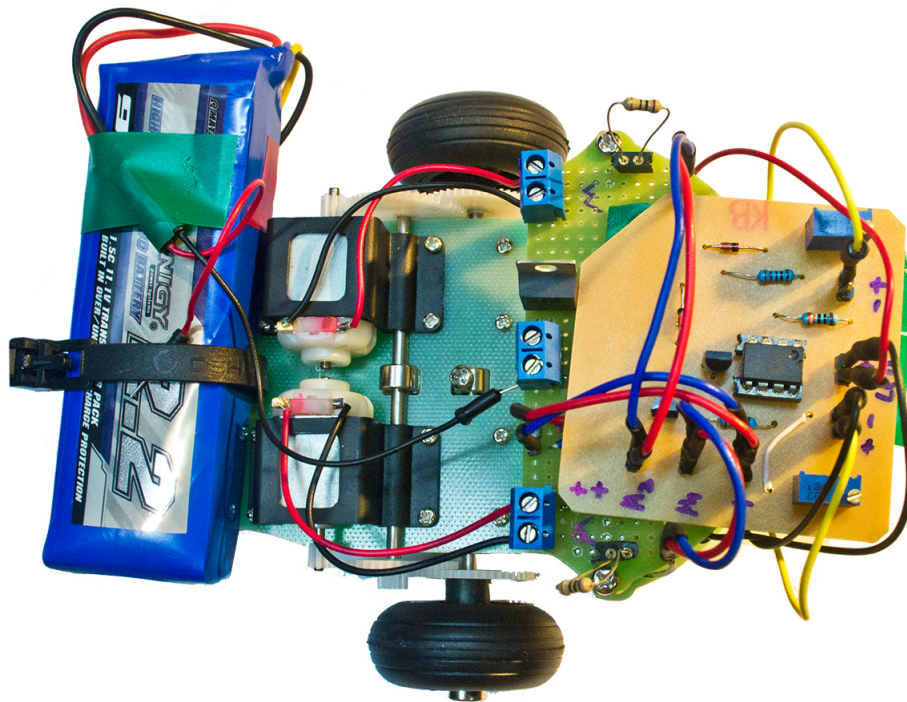


Figura 30: AGV Montado versão final, visão superior.

Tabela 2: Lista de Materiais

Nome	Quantidade
Amplificador Operacional LM358	1x
Potenciômetro 100k	2x
LED Vermelho de Alto Brilho	2x
Resistor 1k Ω	2x
Resistor 300 Ω	1x
Resistor de 10 Ω	2x
Diodo	2x
Motor CC	2x
Fotoresistor LDR	2x
Regulador de Tensão 5V 7805	1x

9 Sugestão para trabalhos futuros

No presente projeto, foi utilizado somente componentes analógicos, resistores, leds, dois amplificadores operacionais, entre outros. Existem diversas maneiras de projetar e montar um robô seguidor de linha autônomo. Como trabalhos futuros à este, pode ser feito um projeto mais complexo, utilizando conhecimentos de controle, como PI/PD, com a finalidade de aumentar a estabilidade e velocidade de resposta do circuito, ou então utilizar microcontroladores.

Nos AGVs encontrados na indústria, todos eles apresentam controle utilizando microcontroladores, podendo assim serem programados para efetuar tarefas mais complexas, como a de assegurar a segurança das pessoas ao seu redor (parando seu movimento caso alguma pessoa passe perto do carro), ou então de aguardar comandos sem-fio para se deslocarem para pontos específicos da fábrica.

10 Conclusões

Seguindo um circuito simples, no que se refere aos componentes utilizados, obteve-se êxito na implementação do **Robô Seguidor de Linha**. A partir de simulações foi possível modelar e analisar o circuito utilizado, comprovando a viabilidade do projeto. Conseguimos assim, utilizar conhecimentos adquiridos nas aulas teóricas de Eletrônica Aplicada e colocá-los em prática.

A implementação, como em qualquer projeto de engenharia, necessitou algumas correções que não foram possíveis de serem testadas nas simulações, mas após estes ajustes o robô efetuou o que foi proposto, percorrer a trajetória desenhada no chão sem nenhum problema.

11 Referências Bibliográficas

- [1] R.L. Boylestad, L. Nashelsky. *Electronic Devices and Circuit Theory*. International Edition, 2009 (10th Ed.)
- [2] Adel S. Sedra and Kenneth C. Smith *Microeletrônica*. (4a Ed.)
- [3] Wikipédia - Automated Guided Vehicle http://en.wikipedia.org/wiki/Automated_guided_vehicle, acesso Maio 2013.
- [4] Fitzgerald, A. E.; Kingsley, Charles; Kusko, Alexander. *Máquinas elétricas – com introdução à eletrônica de potência*. (Porto Alegre: Bookman, 2006)

12 Anexos

12.1 Datasheet do LM358

Low Power Dual Operational Amplifier

DESCRIPTION

The LM358 contains two independent high gain operational amplifiers with internal frequency compensation. The two op-amps operate over a wide voltage range from a single power supply. Also use a split power supply. The device has low power supply current drain, regardless of the power supply voltage. The low power drain also makes the LM358 a good choice for battery operation.

When your project calls for a traditional op-amp function, now you can streamline your design with a simple single power supply. Use ordinary +5VDC common to practice any digital system or personal computer application, without requiring an extra 15V power supply just to have the interface electronics you need.

The LM358 is a versatile, rugged workhorse with a thousand-and-one uses, from amplifying signals from a variety of transducers to DC gain blocks, or any op-amp function. The attached pages offer some recipes that will have your project cooking in no time.

FEATURES

- Internally frequency compensated for unity gain
- Large DC voltage gain: 100dB
- Wide bandwidth (unity gain): 1 MHz (temperature-compensated)
- Wide power supply range:
 - Single supply: 3VDC to 32 VDC
 - Dual supplies: +1.5VDC to +16VDC
- Input common-mode voltage range includes ground
- Large output voltage swing: 0V DC to $V_{CC}-1.5V$ DC
- Power drain suitable for battery operation
- Low input offset voltage and offset current
- Differential input voltage range equal to the power supply voltage

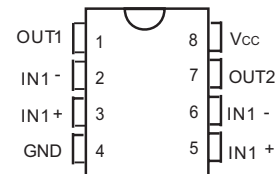
APPLICATION

- Transducer Amplifiers
- DC Gain-blocks
- All The Conventional Op Amp Circuits

ORDERING INFORMATION

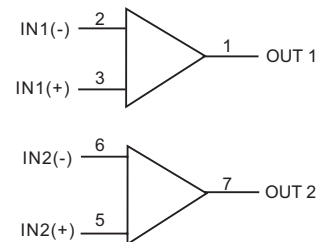
Temperature Range	Package		Orderable Device	Package Qty
-40°C to +85°C	SOP-8L	Pb-Free	LM358D	100Units/Tube
	DIP-8L		LM358DR	3000Units/R&T
			LM358P	50Units/Tube

PIN CONFIGURATION



(Top View)

LOGIC SYMBOL



SCHEMATIC DIAGRAM

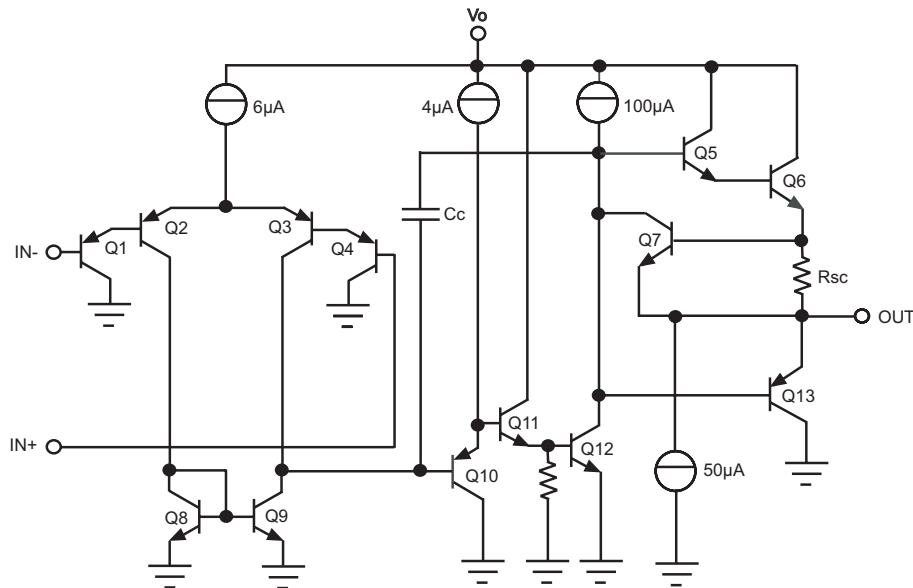


Figure 1. Schematic

ABSOLUTE MAXIMUM RATINGS(NOTE1)

Parameter	Symbol	Value	Unit
Power Supply Voltages	V_{CC}	32	V
		± 16	
Input Differential Voltage Range(Note 2)	V_{IDR}	± 32	V
Input Common Mode Voltage Range	V_{ICR}	-0.3 to 32	V
Output Short Circuit Duration	I_{SC}	Continuous	
Junction Temperature	T_J	150	$^{\circ}C$
Storage Temperature	T_{Stg}	-55 to +125	$^{\circ}C$
Input Current,per pin(Note 3)	I_{IN}	50	mA
Lead Temperature,1mm from Case for 10 Seconds	T_L	260	$^{\circ}C$

Note 1:Maximum Ratings are those values beyond which damage to the device may occur. Functional operation should be restricted to the Recommended Operating Conditions.

Power Derating:

DIP Package:-10mW/ $^{\circ}C$ from 65 to 125 $^{\circ}C$

SOP Package:-7mW/ $^{\circ}C$ from 65 to 125 $^{\circ}C$

Note 2:Split Power Supplies.

Note 3: $V_{IN} < -0.3V$. This input current will only exist when voltage at any of the input leads is driven negative.



RECOMMENDED OPERATING CONDITIONS

Parameter		Symbol	Min	Max	Unit
DC Supply Voltage	Single Supply	V_{CC}	5.0	30	V
	Split Supplies		± 2.5	± 15	
Operating Temperature, All Package Types		T_A	-40	+85	$^{\circ}\text{C}$

Note: This device contains protection circuitry to guard against damage due to high static voltages or electric fields. However, precautions must be taken to avoid applications of any voltage higher than maximum rated voltages to this high-impedance circuit. For proper operation, V_{IN} and V_{OUT} should be constrained to the range $\text{GND} \leq (V_{IN} \text{ or } V_{OUT}) \leq V_{CC}$.

Unused inputs must always be tied to an appropriate logic voltage level (e.g., either GND or V_{CC}).

Unused outputs must be left open.

ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_A = -40$ to $+85^{\circ}\text{C}$)

Parameter	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Maximum Input Offset Voltage	V_{IO}	$V_O = 1.4\text{V}, V_{CC} = 5.0\text{--}30\text{V}$ $R_S = 0, V_{ICM} = 0\text{V to } V_{CC} - 1.7\text{V}$			9.0 5.0*	mV
Input Offset Voltage Drift	$\Delta V_{IO}/\Delta T$	$R_S = 0\Omega, V_{CC} = 30\text{V}$		7.0		$\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$
Maximum Input Offset Current	I_{IO}	$V_{CC} = 5.0\text{V}$			150 50*	nA
Input Offset Current Drift	$\Delta I_{IO}/\Delta T$	$R_S = 0\Omega, V_{CC} = 30\text{V}$		10		$\text{pA}/^{\circ}\text{C}$
Maximum Input Bias Current	I_{IB}	$V_{CC} = 5.0\text{V}$			500 250*	nA
Input Common Mode Voltage Range	V_{ICR}	$V_{CC} = 30\text{V}$	0		28	V
Maximum Power Supply Current	I_{CC}	$R_L = \infty, V_{CC} = 30\text{V}, V_O = 0\text{V}$			3	mA
		$R_L = \infty, V_{CC} = 5\text{V}, V_O = 0\text{V}$			1.2	
Minimum Large Signal Open-Loop Voltage Gain	A_{VOL}	$V_{CC} = 15\text{V}$ $R_L \geq 2\text{k}\Omega$	15 25*			V/mV
Minimum Output Low-Level Voltage Swing	V_{OH}	$V_{CC} = 30\text{V}, R_L = 2\text{k}\Omega$	26			V
		$V_{CC} = 30\text{V}, R_L = 10\text{k}\Omega$	27			
Maximum Output Low-Level Voltage Swing	V_{OL}	$V_{CC} = 5\text{V}, R_L = 10\text{k}\Omega$			20	mV
Common Mode Rejection	CMR	$V_{CC} = 30\text{V}, R_L = 10\text{k}\Omega$	65*			dB



ELECTRICAL CHARACTERISTICS(CONTINUED)

Parameter	Symbol	Test Conditions	Min	Typ	Max	Unit
Power Supply Rejection	PSR	$V_{CC}=30V$	65*			dB
Channel Separation	CS	$f=1kHz$ to $20kHz$, $V_{CC}=30V$	-120*			dB
Maximum Output Short Circuit to GND	I_{SC}	$V_{CC}=5.0V$			60*	mA
Minimum Output Source Current	I_{SOURCE}	$V_{IN+}=1V, V_{IN-}=0V$, $V_{CC}=15V, V_O=0V$	-10			mA
Minimum Output Sink Current	I_{SINK}	$V_{IN+}=0V, V_{IN-}=1V$, $V_{CC}=15V, V_O=15V$	5 10*			mA
		$V_{IN+}=0V, V_{IN-}=1$, $V_{CC}=15V, V_O=0.2V$	12*			μA
Differential Input Voltage Range	V_{IOR}	ALL $V_{IN}>GND$ or V-Supply(ifused)			V_{CC}^*	V

*at $T_A=25^\circ C$



TYPICAL PERFORMANCE CHARACTERISTICS

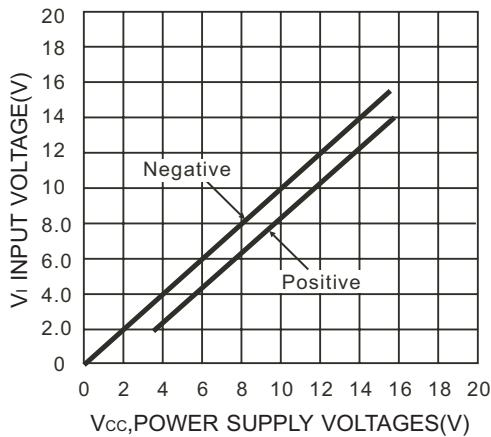


Figure 2. Input Voltage Range

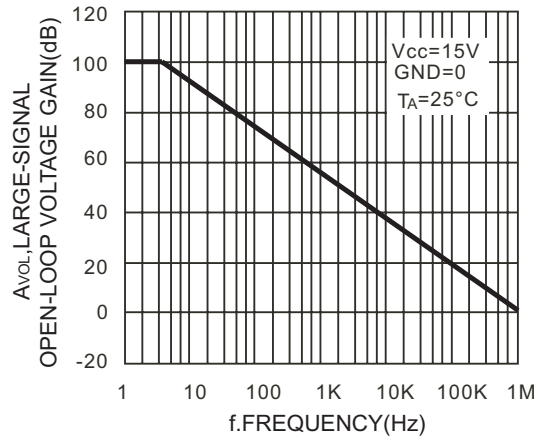


Figure 3. Open-Loop Frequency

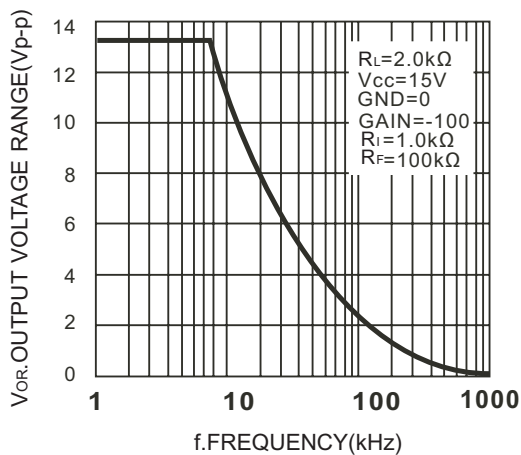


Figure 4. Large-signal Frequency Response

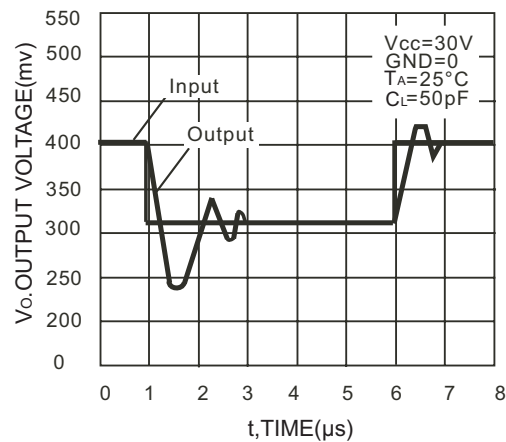


Figure 5. Small-Signal Voltage Follower Pulse Response (Non-inverting)

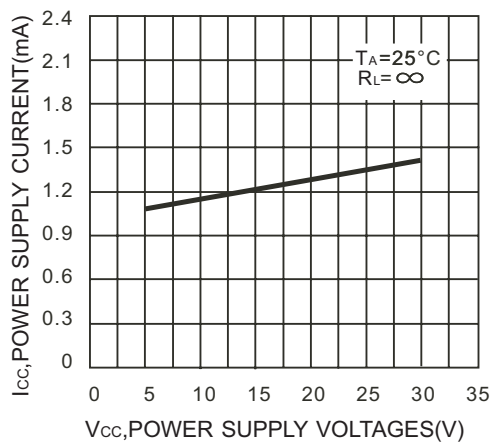


Figure 6. Power Supply Current VS. Power Supply Voltage

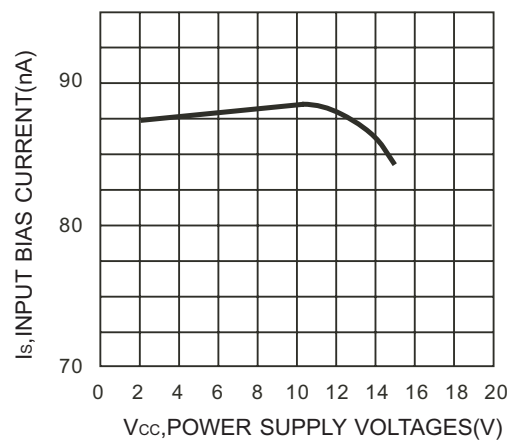


Figure 7. Input Bias Current VS. Power Supply Voltage

