



FELIPE DOS SANTOS SCOFANO

**DESENVOLVIMENTO DE UM
SISTEMA DE CONTROLE
REMOTO PARA UM ROBÔ DE
COMBATE**

TRABALHO DE FIM DE CURSO

ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

DEZ/2003

Agradecimentos

Gostaria de fazer um agradecimento a todas as pessoas que colaboraram de alguma forma com esse projeto como um todo, não só na parte eletrônica. Pessoas como Ney Robson (CENPES), Luti e Buá (EPTCA Medical Devices), Valentim (Usinagens), Nelson (elétrica), Eduardo (PIC), Miguel (PIC), Felipe Maimon (eletrônica), Amanda e Carla (motores BOSCH), Tio Jorge (Usinagens), Brás (Usinagens), Cid Lopes (BOSCH); aos professores, Prof. Jaime Castro, Prof. Solly, Prof. Mauro Schwanke, Prof. Mauro Speranza, Prof. José A. R. Parise; aos órgãos da PUC, ITUC (mecânica), CETUC (eletrônica), Jornal da PUC, TV PUC, a própria PUC-Rio; aos patrocinadores, EPTCA Medical Devices LTDA, Grupo Oliveira Guimarães, Decanato da PUC-Rio, CETUC – Centro de Estudos em Telecomunicações (PUC-Rio), InovAção; aos amigos Luiz Guilherme Barcik e Rubens Arbex, e um agradecimento especial a todos os integrantes da equipe RioBotz, a primeira equipe da PUC-Rio e do Rio de Janeiro a participar da Guerra de Robôs, Prof. Marco Antonio Meggiolaro (coordenador da equipe), Felipe Belo, Júlio Guedes, Pedro Blois, Cláudio Duvivier, Rodrigo Carvalho e Cristiane Almeida.

Resumo

O presente trabalho descreve o projeto de um sistema eletrônico capaz de controlar um robô de combate elaborado na Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro para participar de uma competição nacional conhecida como “Guerra de Robôs”. O projeto compreende, além de pesquisa, o desenvolvimento de um produto final. O sistema envolve circuitos decodificadores de sinais de rádio-controle e circuitos de potência para o acionamento de moto-redutores elétricos de alta amperagem. São expostos com detalhes os problemas ocorridos durante a concepção dos circuitos, assim como os aperfeiçoamentos em cada versão e os cuidados que se deve ter com os componentes principais utilizados. Vários *softwares* profissionais de projeto são utilizados, contribuindo de forma significativa para o *layout* de placa, simulação dos circuitos e posterior miniaturização das placas de circuito impresso confeccionadas. O sistema eletrônico final é incorporado à estrutura do robô, controlando com sucesso os seus movimentos e suportando picos de sobrecarga de corrente de até 75A.

Abstract

The present work describes the design of an electronic system to control a combat robot developed at the Pontifical University Catholic of Rio de Janeiro to participate in a national competition known as “Guerra de Robôs” (Robot War). The work comprises not only of the design of the electronic system, but also its implementation in a final product. The system involves radio-control decoder circuits and power circuits for the drive of high-amperage DC motors. The problems occurred during the conception of the circuits are discussed, as well as the improvements made in each version and the proper care associated with each of the main components. Several professional pieces of software are used, which contribute in a very significant way to the simulation and improvements of the board layout, as well as reducing the final size of the printed circuit boards. The final electronic system is incorporated into the structure of the robot, successfully controlling its movements while bearing current peaks of up to 75A.

Sumário

Resumo	II
Abstract	III
1 – Introdução	1
2 – Projeto Mecânico	3
2.1 – Funcionamento do Robô	3
2.2 – Protótipo	7
2.3 – Versão Final	13
3 – Rádio Frequência	19
3.1 Transmissão dos Sinais	20
3.2 Rádio Controle	21
3.3 Receptor	23
3.4 Servos	25
3.4.1 Função básica dos servos	26
3.4.2 Controlando Servos	26
4. Projeto Eletrônico	29
4.1 Descrição da eletrônica	30
4.1.1 Ponte H	32
4.1.2 Relés	33
4.2 Eletrônica de Sentido	36
4.3 Eletrônica de Potência	41
4.3.1 FET - Transistores de Efeito de Campo	43
4.3.2 MOSFETs	47
4.3.3 Mecanismos de falha dos MOSFETs	50
4.4 Implementação	53
4.4.1 Versão 1	57
4.4.2 Versão 2	59
4.4.3 Versão 3	64
5. Projeto Final (Versão 4) e Resultados	70
5.1 Paralelismo de MOSFETs	70
6. Conclusões	79
7. Bibliografia	81
APÊNDICE 1 - Datasheets, especificações, gráficos e outros	83

Índice de Figuras

<i>Fig. 1 – Esquema do movimento rotacional do robô</i>	4
<i>Fig. 2 – Movimentação do ataque frontal</i>	5
<i>Fig. 3 – Movimentação do ataque lateral</i>	5
<i>Fig. 4 – Base estrutural do “LACRAIA”</i>	8
<i>Fig. 5 – Base estrutural com o braço (haste)</i>	9
<i>Fig. 6 – Montagem completa do corpo do robô</i>	9
<i>Fig. 7 – Desenho em SolidWorks do protótipo</i>	10
<i>Fig. 8 – Desenho em SolidWorks do protótipo</i>	10
<i>Fig. 9 – Desenho em SolidWorks do protótipo</i>	11
<i>Fig. 10 – Protótipo finalizado</i>	11
<i>Fig. 11 – Protótipo finalizado</i>	12
<i>Fig. 12 – Protótipo finalizado</i>	12
<i>Fig. 13 – Protótipo finalizado</i>	13
<i>Fig. 14 – Versão Final; detalhe do suporte do braço e das baterias</i>	15
<i>Fig. 15 – Motor/redução com o acoplamento elástico</i>	16
<i>Fig. 16 – Versão final; vista frontal</i>	16
<i>Fig. 17 – Vista superior, com a esfera de aço da extremidade do braço</i>	17
<i>Fig. 18 – Versão Final do “LACRAIA” com a carcaça de alumínio</i>	18
<i>Fig. 19 – Propagação do sinal do rádio controle</i>	20
<i>Fig. 20 – Receptores</i>	23
<i>Fig. 21 – Sinal recebido pelo receptor</i>	24
<i>Fig. 22 – Sinais transmitidos do rádio controle de acordo com a posição do manche</i>	24
<i>Fig. 23 – Servos</i>	25
<i>Fig. 24 – Propagação do sinal do rádio controle</i>	26
<i>Fig. 25 – Conector servo</i>	27
<i>Fig. 26 – Sinal de controle recebido pelo servo</i>	28
<i>Fig. 27 – Torque estimado versus Corrente</i>	31
<i>Fig. 28 – Torque estimado versus RPM</i>	31
<i>Fig. 29 – Torque estimado versus Potência Mecânica</i>	31
<i>Fig. 30 – Esquema de uma ponte H</i>	32
<i>Fig. 31 – Construção e operação do relé</i>	34
<i>Fig. 32 – Um relé aberto</i>	34
<i>Fig. 33 – Diagrama de blocos do caminho que o sinal percorre até o acionamento dos motores</i>	36
<i>Fig. 34 – Posições assumidas pelos relés de acordo com a largura do pulso lida</i>	37
<i>Fig. 35 – Circuito digital decodificador</i>	38
<i>Fig. 36 – Circuito analógico para setar os relés</i>	39
<i>Fig. 37 – Potência é fornecida ou não de acordo com a largura do pulso</i>	42
<i>Fig. 38 – Parte de potência do circuito do robô</i>	42

Fig. 39 – Símbolo esquemático dos canais n e p do JFET	44
Fig. 40 – Junção FET com material tipo n entre materiais do tipo p	44
Fig. 41 – Região de depleção com um aumento da tensão V_{GS}	45
Fig. 42 – Relação entre a corrente dreno-fonte (I_D) e a tensão dreno-fonte (V_{DS}) para cada tensão V_{GS}	46
Fig. 43 – Região espessa de óxido separando a porta e o canal	47
Fig. 44 – Curva típica do MOSFET de canal-n	48
Fig. 45 – MOSFET que explodiu devido à alta corrente durante os testes	53
Fig. 46 – Microcontrolador PIC	55
Fig. 47 – Circuito montado em uma Proto-Board	58
Fig. 48 – Layout da placa versão 1	58
Fig. 49 – Placa versão 2, de potência sem os FETs, que foram reaproveitados	60
Fig. 50 – Placa versão 2, sem alguns componentes que também foram reaproveitados	61
Fig. 51 – Parte de baixo (bottom) da placa versão 2, com solda nas trilhas por onde passava potência	62
Fig. 52 – Problemas provocados pela alta corrente	63
Fig. 53 – Placa versão 3 (sinais de baixa potência)	65
Fig. 54 – Placa versão 3 (bottom)	66
Fig. 55 – Trilhas arrebentadas	66
Fig. 56 – Placa de potência dos FET's com os dissipadores	67
Fig. 57 – Caixa da eletrônica completa, com todas as placas	67
Fig. 58 – Parte de trás da caixa, com o detalhe dos relés	68
Fig. 59 – Eletrônica versão 3	68
Fig. 60 – Placa de fenolite usada para a montagem do circuito de potência	72
Fig. 61 – FETs em paralelo	73
Fig. 62 – Detalhe da barra sindal unindo os fios e os relés	74
Fig. 63 – Placa de sinais fixada sob a placa de fenolite	75
Fig. 64 – Placa de baixa potência (sinais)	76
Fig. 65 – Projeto final completo	76
Fig. 66 – Dissipadores usados ao longo do projeto, cronologicamente da esquerda para a direita	77
Fig. 67 – “LACRAIA” pronto para o combate	77

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Movimentação do robô	6
Tabela 2 – Comparação ente o protótipo e a versão final do “LACRAIA”	14
Tabela 3 – Comparação entre os diferentes tipos de rádios	21
Tabela 4 – Correntes no motor	32
Tabela 5 – Correntes medidas no circuito de potência	78

1 – Introdução

Com avanço da eletrônica, o crescimento da robótica tem se verificado em diversos meios, principalmente na indústria, propiciando uma maximização da produtividade através de um maior controle em fatores como a qualidade do produto e a intervenção em ambientes insalubres. Por motivos como esse, é importante que a robótica seja incentivada em instituições de ensino para que o Brasil possa desenvolver-se no ambiente globalizado em que a economia está imersa atualmente, em uma área de grande potencial que ainda tem muito por ser explorada. Assim, foi criado um evento com a finalidade de proporcionar aos estudantes um maior contato com essa importante área, denominado “GUERRA DE ROBÔS”, patrocinado pela Finep e CNPq, com participação de diversas das mais renomadas universidades brasileiras, onde combates entre mini-veículos radio-controlados (robôs) são realizados dentro de uma arena.

Partindo de uma idéia criada inicialmente nos Estados Unidos, há três anos vem sendo realizada no Brasil a “Guerra de Robôs”, que é uma competição universitária onde robôs rádio-controlados, produzidos por estudantes de graduação em engenharia, competem entre si.

Mais do que uma competição, este evento possibilita reunir estudantes, professores e empresários voltados para essa área de atuação, fazendo com que todos interajam com o que há de mais novo no mercado. O desenvolvimento destes robôs é um verdadeiro projeto de engenharia, onde a equipe projetista elabora desde o *design* do robô, até a sua montagem e funcionamento. Além disso, este evento proporciona uma grande divulgação das Universidades participantes e das empresas patrocinadoras. Vale a pena ressaltar a importância que a participação de empresas, não importando se são grandes ou pequenas ou de áreas diferentes, tem para projetos voltados para o desenvolvimento tecnológico em geral. Essa contribuição viabiliza, por exemplo, projetos como

esse a saírem do papel, estimulando o desenvolvimento do estudante e o desenvolvimento de tecnologia no Brasil.

Esta dissertação está organizada em seis capítulos. No Capítulo 2 faz-se uma apresentação dos aspectos mecânicos do robô. O Capítulo 3 descreve o funcionamento de um sistema baseado em rádio frequência. No Capítulo 4 relata-se detalhadamente o projeto eletrônico, expondo todas as implementações feitas, aperfeiçoamentos e problemas ocorridos. O Capítulo 5 apresenta a versão final do projeto eletrônico, juntamente com os resultados obtidos. E, finalmente, o Capítulo 6, as conclusões do trabalho.

2 – Projeto Mecânico

Em se tratando de uma competição onde os robôs devem se confrontar diretamente é muito importante que estes sejam construídos de forma a possuir uma boa resistência física. Os robôs são avaliados através de uma pontuação referenciada em três fatores: agilidade, agressividade e imobilização. Dessa forma, uma estratégia de combate deve ser definida pela equipe a fim de que o resultado desejado seja alcançado.

Com isso, esforços foram concentrados para desenvolver um robô mecanicamente o mais simples possível, robusto e que mantivesse sua funcionalidade durante toda a competição. Portanto, a estratégia de combate se voltou para a construção de um robô resistente, robusto, de simples funcionamento e com um *design* que valoriza a sua própria defesa.

2.1 – Funcionamento do Robô

A idéia robô, apelidado de “LACRAIA”, foi baseada em um robô participante de uma competição norte-americana chamada *BattleBots*. Depois de uma vasta pesquisa, decidiu-se que um robô com o *design* denominado *Overhead Thwack Bots* (Robôs com golpe por sobre a cabeça) se enquadraria na estratégia de combate. Esse tipo de robô foi usado pela primeira vez na competição *Robot Wars* (1995) e consiste em um robô caracterizado por uma base larga e duas rodas, com o corpo principal sendo construído inteiramente na seção reta entre as duas rodas, enquadrado em seu raio, e um longo braço com uma arma em sua ponta, tal que o seu corpo gire com um movimento brusco, lançando a arma para baixo e indo de encontro ao oponente sempre que a direção do robô for mudada rapidamente.

Este tipo de robô utiliza o torque dos seus motores para dar potência ao impacto com a arma. O seu ataque se dá pela reversão no sentido de rotação dos seus motores rapidamente, produzindo um torque de reação, fazendo com que seu corpo gire e traga o braço com a arma para o lado inverso com grande energia.

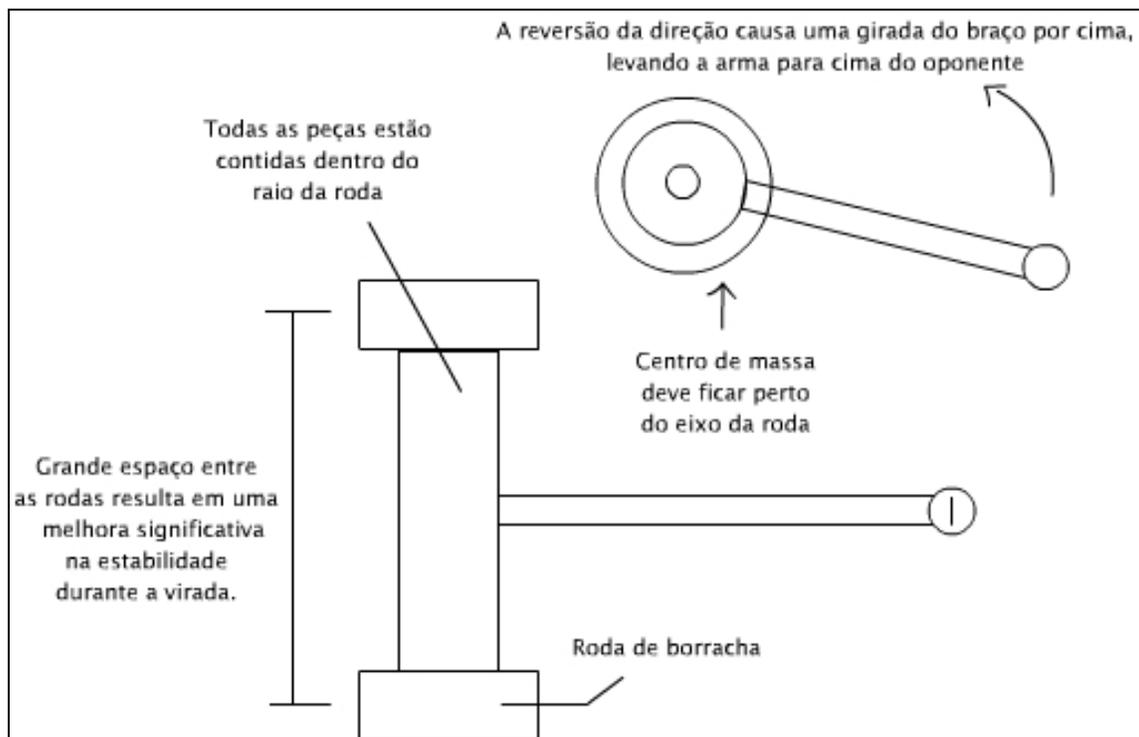


Fig. 1 – Esquema do movimento rotacional do robô

O desafio consiste em conseguir uma inércia suficiente para permitir o giro do corpo do robô, com uma força significativa e acurácia para acertar o oponente. A mesma inversão na direção dos motores que faz com que a arma gire sobre o corpo do robô também faz com que ele se afaste do alvo. O ataque deste tipo de robô é realizado chegando próximo ao alvo e então revertendo a sua direção um pouco antes do impacto. Todo o robô deve estar bem balanceado para que ele vire rápido, antes de começar a recuar significativamente. Uma tração insuficiente ou irregular das rodas

com o chão pode resultar numa mudança de direção do robô para um lado durante a virada, fazendo com que a arma erre o alvo pretendido.

Robôs que executam o seu movimento por cima do seu corpo devem produzir toda a potência para a sua arma em pouco mais da metade de uma volta completa das suas rodas. Os componentes elétricos e mecânicos que transmitem essa potência devem ser otimizados para uma alta taxa de descarga de corrente, baterias com alta capacidade, fiação de grande seção reta, motores com alto torque e um sistema de transmissão resistente são essenciais. Todos os componentes devem estar situados na seção reta entre as rodas para que o robô possa girar livremente. Geralmente, esses robôs possuem rodas com diâmetro grande para garantir o espaço necessário das peças que irão compor o corpo principal. Note que rodas com o diâmetro muito grande resultam numa aceleração mais lenta, porém uma velocidade final mais alta é obtida.



Fig. 2 – Movimentação do ataque frontal

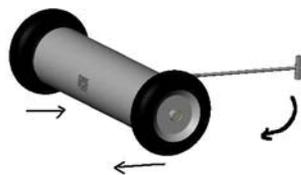


Fig. 3 – Movimentação do ataque lateral

A melhor técnica de otimização para este tipo de robô é aumentar a potência dos seus motores o máximo possível. Aumentando o tamanho do braço (haste) e o peso da arma na ponta do braço fará com que os danos causados ao oponente aumentem, mas também fará com que seja mais difícil acertar o oponente de uma forma precisa, devido a um maior desbalanceamento.

Como o robô possui dois motores independentes, cada um conectado a uma das rodas, obtém-se uma combinação de oito movimentos, simplesmente acionando cada motor num sentido ou no outro.

Tabela 1 – Movimentação do robô

Motor Esquerdo	Motor Direito	Movimento
↑.	↑.	Anda para “frente”
↓.	↓.	Anda para “trás”
--	↑.	Faz curva para a esquerda (indo para frente)
↑.	--	Faz curva para a direita (indo para frente)
--	↓.	Faz curva para a esquerda (indo para trás)
↓.	--	Faz curva para a direita (indo para trás)
↑.	↓.	Gira no sentido horário em torno do próprio eixo
↓.	↑.	Gira no sentido anti-horário em torno do próprio eixo

-- → motor parado

Com estes movimentos, pode-se fazê-lo andar para qualquer direção desejada e ainda executar os movimentos de ataque.

2.2 – Protótipo

Em janeiro de 2003, a construção da primeira versão do robô LACRAIA foi iniciada. Como este foi o primeiro ano de competição da PUC-Rio, foi preciso começar o projeto totalmente do zero, deparando-se com dificuldades em especificar motores, baterias, rodas, e todos os componentes mecânicos e elétricos necessários para a sua montagem. A limitação do orçamento e a inexistência de um mercado nacional voltado para esse tipo de aplicação foram desafios a serem superados. Mesmo após algumas especificações, era necessário novamente realizar pesquisas adicionais para encontrar, dentro do que era acessível, as peças e os componentes apropriados. Soluções baratas e criativas foram criadas e adaptações de peças foram feitas. O protótipo foi construído com materiais muitas vezes usados, até que os testes revelassem os componentes que realmente poderiam ser aproveitados. Devido ao *design* inovador do robô na competição brasileira, não foi possível usar componentes similares aos dos robôs das competições anteriores, como, por exemplo, baterias de carro. Foi preciso pesquisar baterias que pudessem funcionar em qualquer posição sem vazamentos e ainda fornecessem a capacidade necessária, sem a opção de importá-las, devido ao alto custo.

A estrutura mecânica também foi crítica, uma vez que teria que ser robusta o suficiente para resistir a todo o tipo de impacto de outros robôs durante a competição. Optou-se por um *design* inspirado na eletrônica dos PIG's, que são equipamentos de altíssima resistência usados pela indústria petrolífera, lançados dentro de dutos com os mais diferentes tipos de fluidos, com a finalidade de realizar inspeções de deformação, corrosão, amassamento, dentre outras. Sendo assim, a base estrutural do corpo do robô foi construída com discos de alumínio em união com hastes roscadas, vide a figura abaixo.



Fig. 4 – Base estrutural do “LACRAIA”



Fig. 5 – Base estrutural com o braço (haste)



Fig. 6 – Montagem completa do corpo do robô

Em paralelo à montagem do protótipo, foram desenhadas todas as peças e projetadas soluções mecânicas necessárias em CAD, utilizando para isso o programa SolidWorks [10]. Com essa ferramenta, foi possível ter noção do espaço físico necessário, encaixes e dimensões das peças, ajustes que deveriam ser feitos antes da confecção e montagem do corpo do robô na prática.

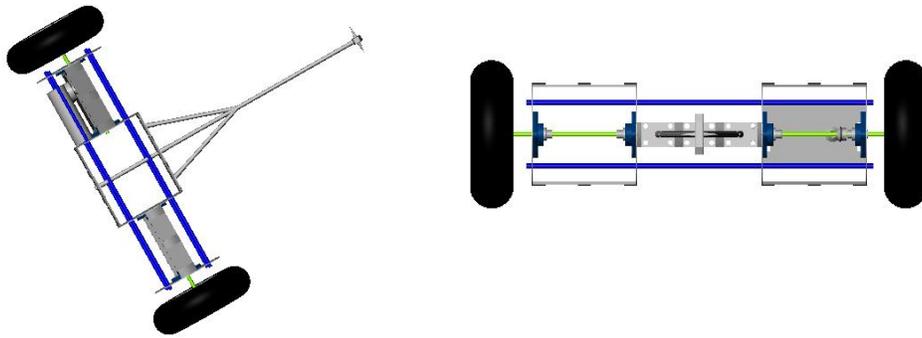


Fig. 7 – Desenho em SolidWorks do protótipo

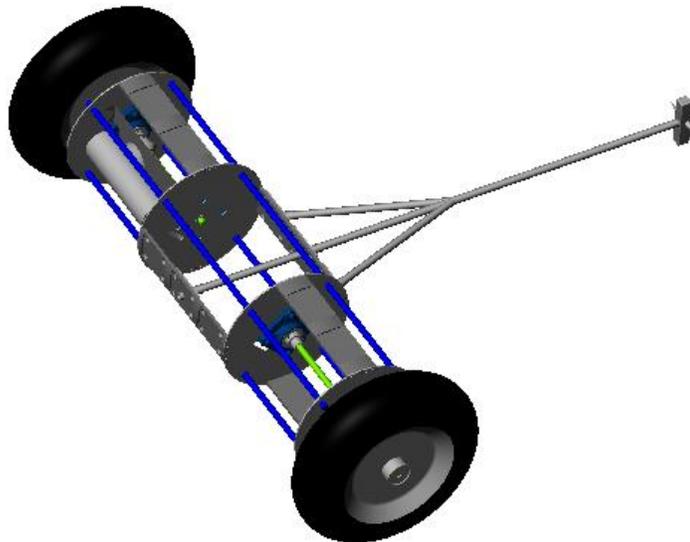


Fig. 8 – Desenho em SolidWorks do protótipo

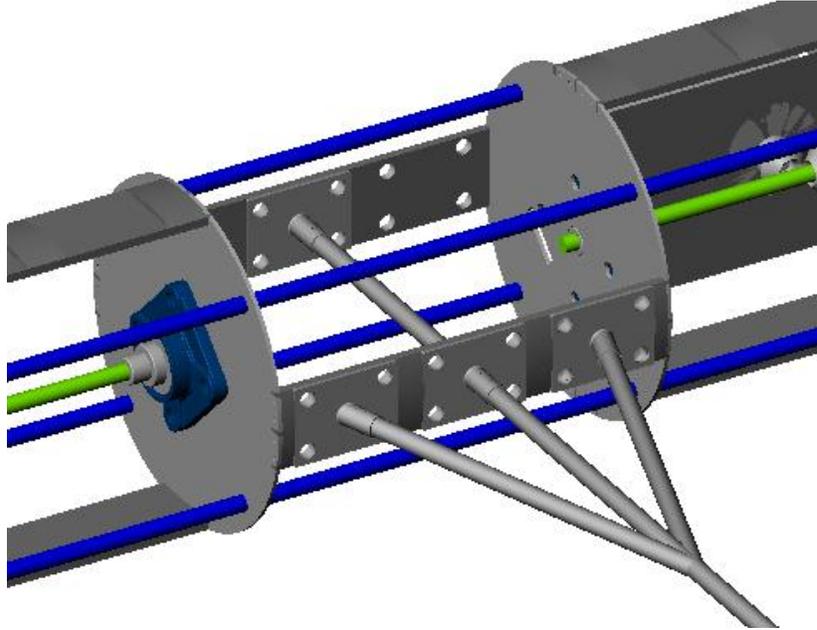


Fig. 9 – Desenho em SolidWorks do protótipo

Durante oito meses, soluções foram elaboradas, muita pesquisa foi feita e, enfim, foi possível concluir o protótipo.



Fig. 10 – Protótipo finalizado



Fig. 11 – Protótipo finalizado



Fig. 12 – Protótipo finalizado



Fig. 13 – Protótipo finalizado

A arma que é colocada na extremidade do braço só foi implementada na versão final do robô.

2.3 – Versão Final

Com a parte mecânica do protótipo concluída, partiu-se então para os melhoramentos em cima dessa estrutura a fim de que a segunda versão do robô fosse construída. Com exceção dos motores/reduções e dos mancais utilizados na construção do protótipo, toda a parte estrutural foi refeita e reprojeta. As principais mudanças entre o protótipo e a versão final estão na tabela 2.

Tabela 2 – Comparação ente o protótipo e a versão final do “LACRAIA”

Protótipo	Versão final	Melhorias
Rodas pneumáticas de 14”;	Rodas maciças de polipropileno de 16”;	Aumentou-se o tamanho das rodas para ganhar mais velocidade e para permitir aumentar o tamanho dos discos de alumínio da estrutura;
Discos estruturais de alumínio com 3mm de espessura e 250mm de diâmetro;	Discos estruturais de alumínio com 5mm de espessura e 300mm de diâmetro;	Os discos ficaram mais resistentes e maiores, englobando todas as peças do robô dentro do seu diâmetro;
Ligação do eixo da redução com o eixo da roda feita através de bucha chavetada;	Ligação do eixo da redução com o eixo da roda feita através de acoplamento elástico;	O acoplamento elástico faz com que o esforço sobre as rodas do robô não seja transmitido diretamente para as caixas de redução, evitando maiores desgastes das peças; ele também corrige possíveis desalinhamentos que possam existir entre os eixos;
Braço preso diretamente nos discos centrais, sem suportes para impactos laterais;	Braço fixado em 3 suportes de aço presos nos discos, com dois suportes (um de cada lado do braço);	Reforçar os impactos laterais sofridos pelo braço;
Não possuía arma na ponta do braço;	Implementação de uma esfera de 1,8kg maciça na ponta do braço;	Aumento do poder de impacto do braço contra os obstáculos;

As melhorias feitas no protótipo foram muito significativas e a sua estrutura ficou muito mais resistente e robusta. Como o projeto mecânico do robô encontra-se fora do escopo deste trabalho, que visa discutir os aspectos da eletrônica do sistema, não serão abordados em maiores detalhes os componentes estruturais envolvidos no projeto.

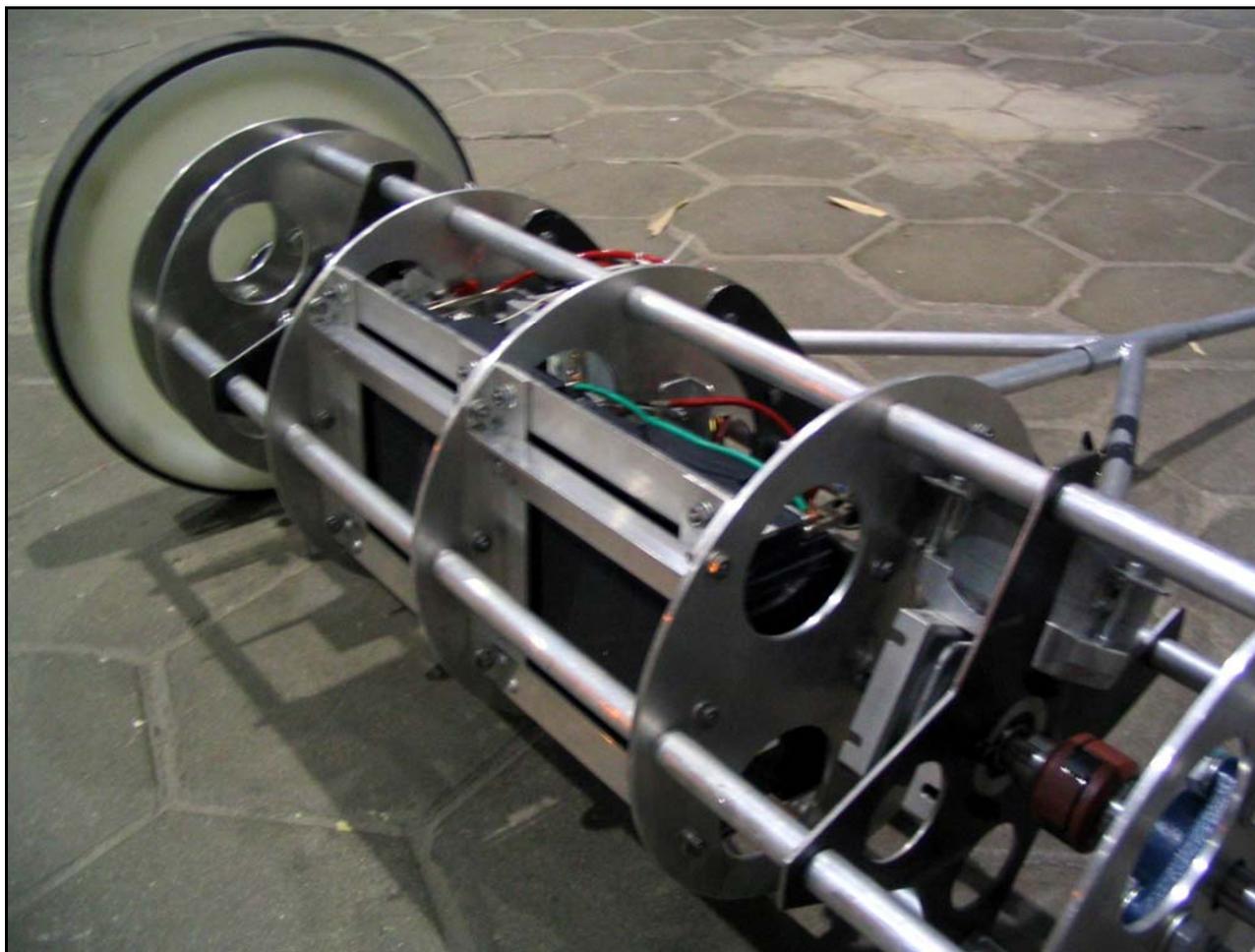


Fig. 14 – Versão Final; detalhe do suporte do braço e das baterias

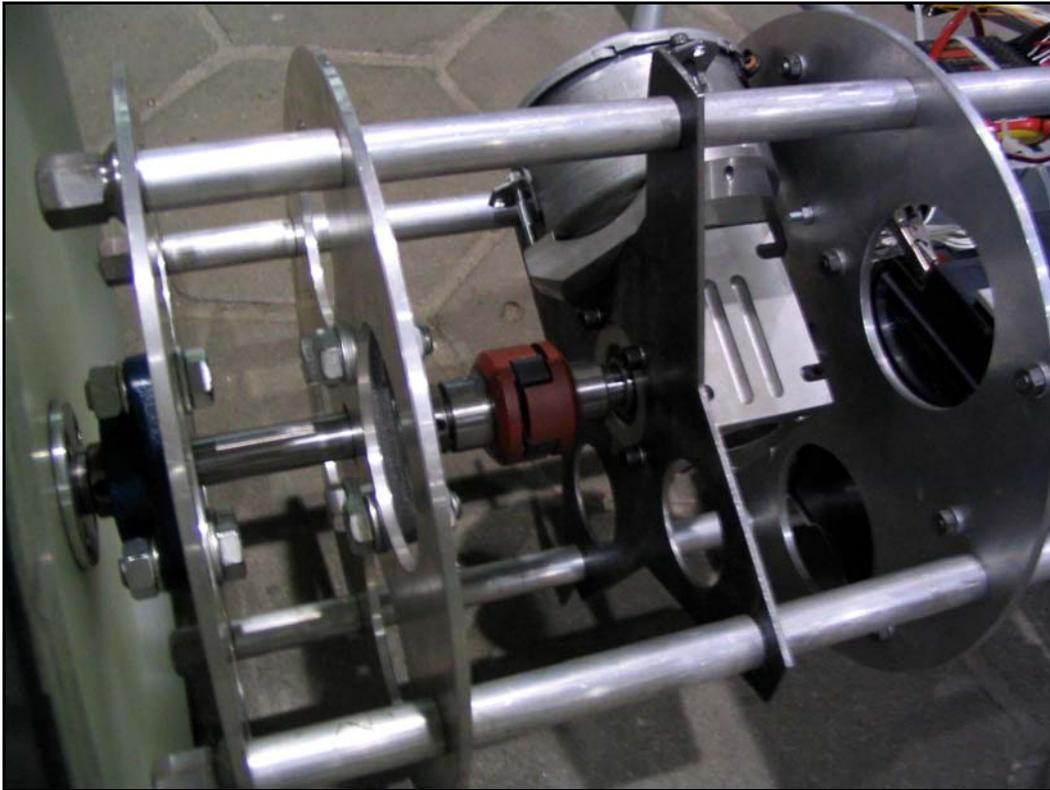


Fig. 15 – Motor/redução com o acoplamento elástico

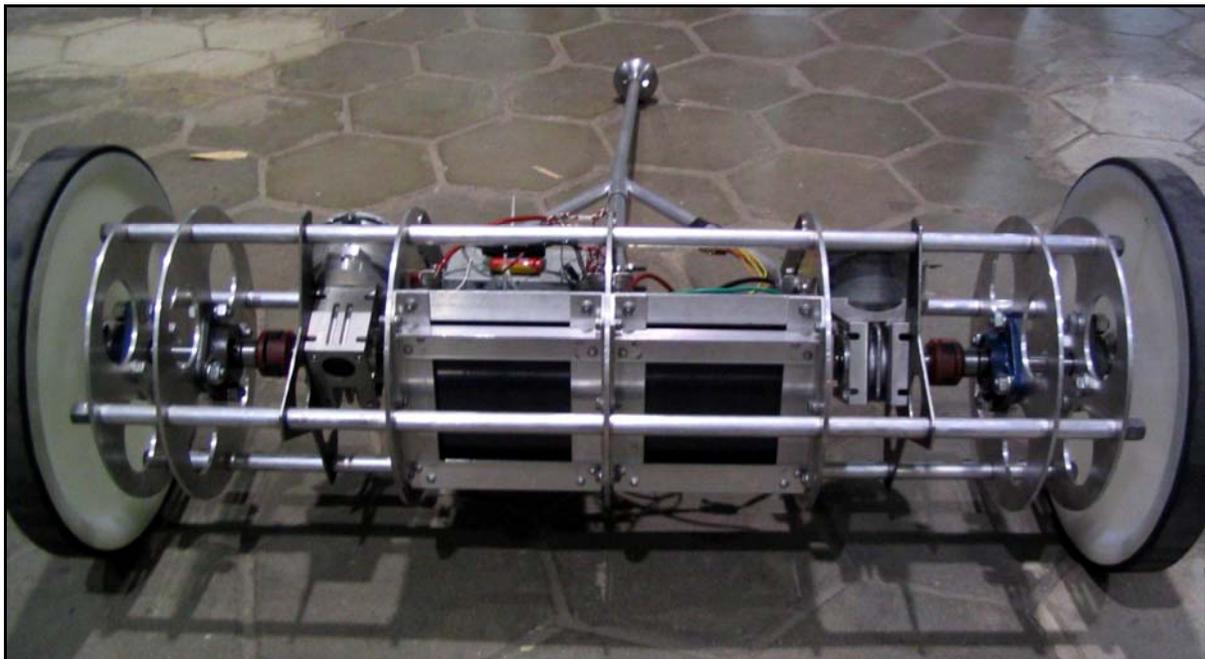


Fig. 16 – Versão final; vista frontal



Fig. 17 – Vista superior, com a esfera de aço da extremidade do braço

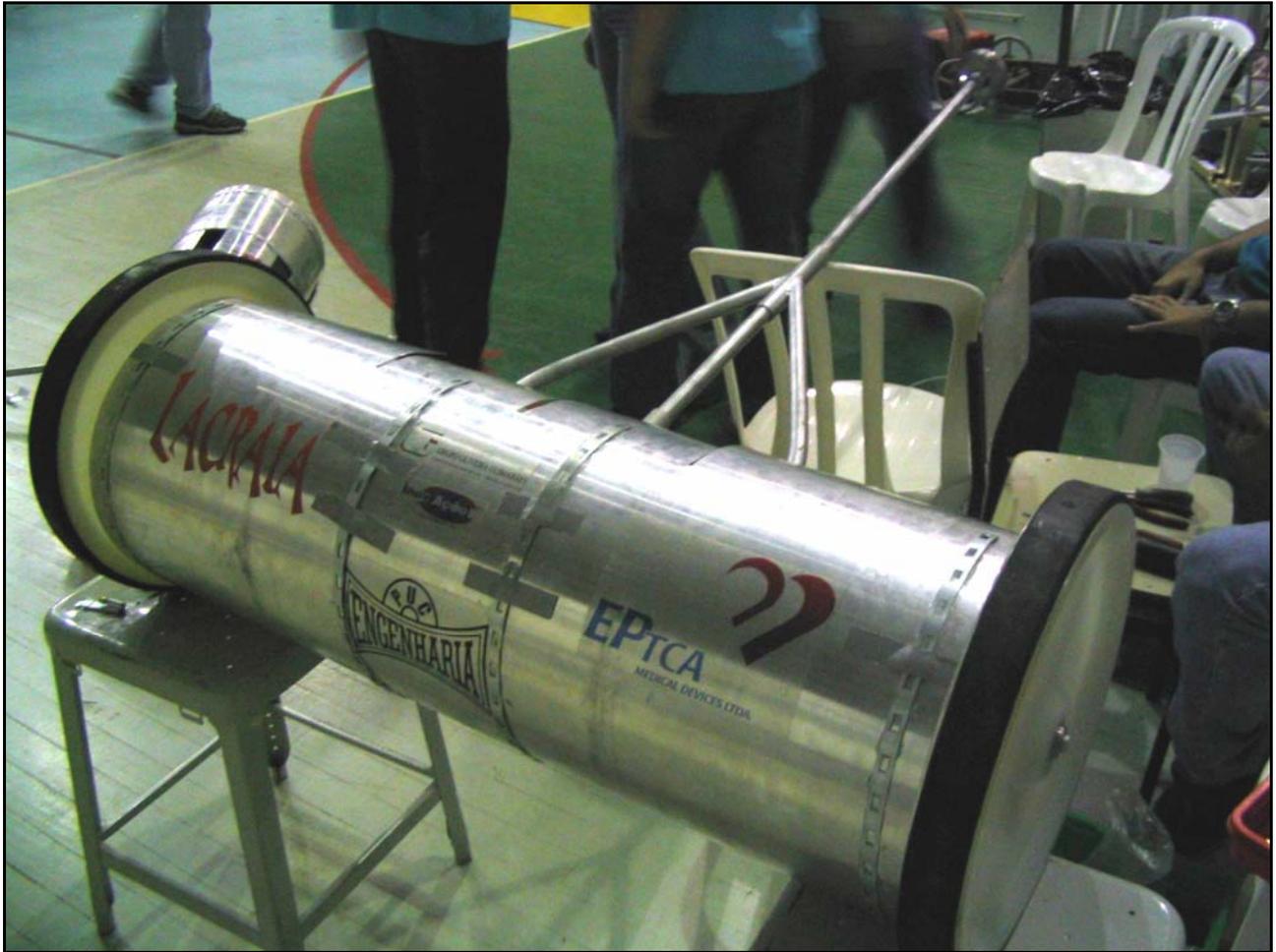


Fig. 18 – Versão Final do “LACRAIA” com a carcaça de alumínio

3 – Rádio Freqüência

O controle por rádio freqüência (RF) proporciona uma interação entre o homem e a máquina, unindo a potência que esta última oferece com as habilidades e percepções de seus operadores. Por isso, as competições voltadas para o combate entre robôs geralmente requerem que os mesmos utilizem esse tipo de controle, ao contrário dos robôs autônomos, que ainda possuem um desempenho limitado.

São dois os principais sistemas de controle utilizados para realizar o comando à distância: o controle efetuado através de um cabo que conecta o operador ao aparelho e o sistema que emprega sinais de rádio. O primeiro apresenta como principal desvantagem a necessidade de operar a curtas distâncias. No segundo sistema obtém-se maior autonomia, ao custo de uma maior e complexidade no controle. O controle remoto de aeromodelos através de sinais de rádio pode ser realizado por meio de dois equipamentos básicos: o monocanal e o multicanal. O primeiro, em que a transmissão é feita por um único canal de rádio, pode controlar, por exemplo, um leme de direção, transmitindo comandos do tipo "esquerda-direita" e ainda acelerar ou desacelerar o motor do modelo. Já os equipamentos multicanal são mais sofisticados e podem controlar um maior número de funções.

Os rádios controles utilizados para o controle dos robôs voltados para esse tipo de competição são os mesmos utilizados nas práticas de modelismo, porém, com atuadores diferentes. Desse modo, é preciso saber como é transmitida essa informação para que esse mesmo sinal enviado pelo rádio possa ser utilizado para controlar os atuadores presentes no robô, motores elétricos de corrente contínua (*Direct Current*, DC, em inglês).

3.1 Transmissão dos Sinais

O sinal emitido pelo rádio controle passa pelas seguintes etapas até chegar ao seu atuador:

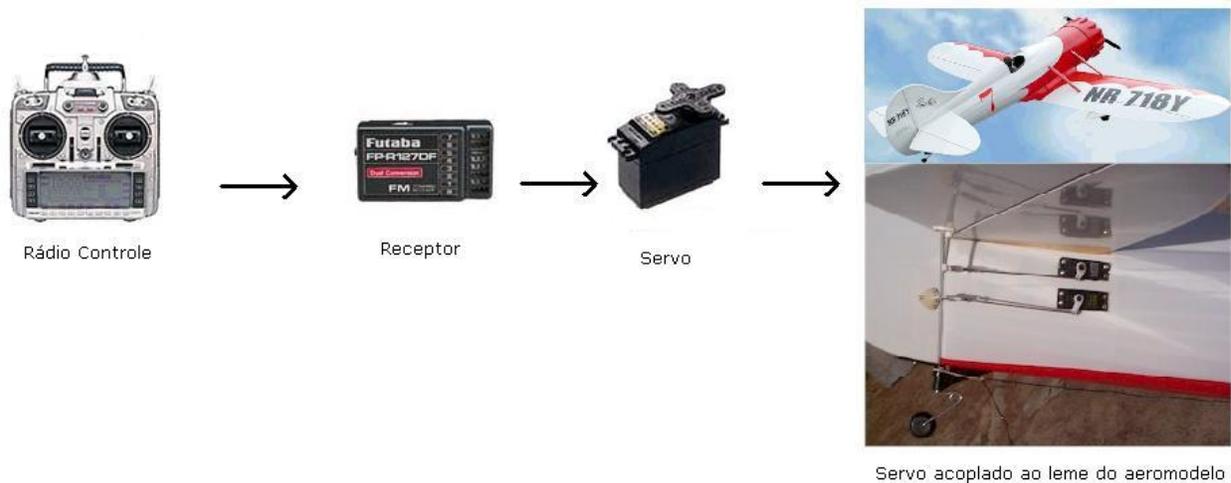


Fig. 19 – Propagação do sinal do rádio controle

O rádio controle transmite um sinal codificado para o receptor que, por sua vez, decodifica esse sinal, enviando ao seu respectivo canal. Cada servo é conectado a um canal no receptor, associado a um controle no rádio. O servo executa o movimento segundo o sinal recebido, fazendo com que o movimento seja transmitido, por exemplo, ao leme do aeromodelo.

3.2 Rádio Controle

Já existe uma enorme variedade de rádios controle no mercado atualmente, de diferentes marcas, que são divididos em três tipos, como descritos na tabela 3.

Tabela 3 – Comparação entre os diferentes tipos de rádios

Método de Modulação	Qualidade do Sinal	Peso e tamanho do receptor	Custo
AM	Boa	Pequeno e leve	Mais barato
FM	Melhor que o AM	Médio	Médio
PCM	Melhor dos três	Maior e mais pesado	Mais caro

Os rádios AM e FM são mais usados em aplicações onde o peso dos componentes é crítico e quando a qualidade do sinal não adiciona um benefício significativo. Os circuitos do PCM (e FM) são usados e requeridos às vezes em sistemas que possuem motores elétricos ou motores a gás. Isto se deve ao ruído adicionado à frequência de rádio (conhecido como o ruído do RF) que tende a ser gerado por esses equipamentos. O importante é que se pode, geralmente, controlar qualquer tipo de sistema utilizando um rádio FM, ou até mesmo um rádio AM, desde que se trate de um sistema simples, com poucos componentes metálicos sendo utilizados. O rádio PCM é realmente mais indicado a aplicações onde o ruído provocado possui relevância na estabilidade do sistema.

AM significa **modulação da amplitude** (*Amplitude Modulation*) e era usado exclusivamente até os últimos 15 anos. Como os rádios AM domésticos, “a informação” que é usada para controlar o sistema é transmitida variando-se a amplitude do sinal de rádio.

FM (ou PPM) significa **modulação da frequência** (*Frequency Modulation*) e são menos propensos à interferência do que o AM. A informação de controle é transmitida variando-se a frequência do sinal de rádio.

PCM significa **modulação de código de pulso** (*Pulse Code Modulation*) e é similar ao FM por se basear em frequências. A diferença entre o PCM e o FM é que no primeiro a informação de controle é emitida na forma de um pulso digital de dados (palavra), ao contrário de um pulso de sinal analógico, menos preciso. Assim, a informação é mantida, garantindo-se a precisão do sinal.

Uma possível desvantagem do PCM é o chamado “*Achilles heel weakness*”. Qualquer ruído atmosférico ou externo, por menor que seja, pode alterar essa palavra binária enviada pelo transmissor ao receptor. No rádio FM, se houver uma interferência externa, a informação é corrompida, mas alguma informação é restaurada. A escolha está entre o risco de não receber nenhum sinal (PCM) e a certeza da recepção de algum sinal (PPM). A maioria dos pilotos de aeromodelos, por exemplo, prefeririam ter algum controle mesmo que errático. Mesmo assim, a modulação PCM possui uma maior imunidade ao ruído que a FM. Os rádios PCMs dispõem de um modo chamado “*fail-safe*”, que faz com que todos os servos assumam a última posição pré-programada pelo piloto caso o sinal não possa ser decodificado pelo receptor. Pode-se comparar o FM a uma fita cassete e o PCM a um CD de áudio. Ambos são completamente adequados, dependendo da aplicação.

Como toda a estrutura do robô deste trabalho é feita de peças metálicas, além da presença de ruídos provocados pelos motores DC utilizados, o uso do rádio PCM é o mais indicado à nossa aplicação, pois garante uma maior imunidade do sinal à interferência, principalmente.

3.3 Receptor

O receptor recebe o sinal do transmissor em trens de pulso, filtrando quaisquer outros tipos de sinais que possam ser captados. O receptor possui pontos para a conexão com servos, assim como para a bateria. O receptor é particular ao seu transmissor, devendo os dois atuar na mesma frequência, assim como possuir o mesmo tipo de modulação do sinal. O receptor recebe o sinal do radio controle da forma descrita a seguir.



Fig. 20 – Receptores

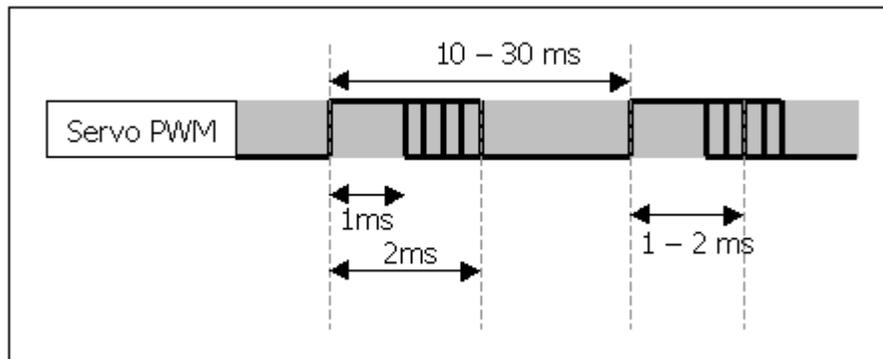


Fig. 21 – Sinal recebido pelo receptor

Um trem de pulsos é enviado em intervalos de tempo regulares que, no máximo, pode chegar a durar 30ms, ainda que alguns fabricantes utilizem um máximo de 20ms entre os pulsos. O receptor utilizado no projeto trabalha na faixa de 20ms. A largura de cada pulso do trem varia entre 1ms e 2ms. Se um servo estiver conectado ao receptor, um pulso de 1ms fará com que o mesmo gire o seu eixo para a sua extremidade mínima e um pulso com largura de 2ms fará com que o seu eixo gire para a sua extremidade máxima. Essa variação é linear, o que significa que a posição central do servo será alcançada enviando um pulso de 1,5ms.

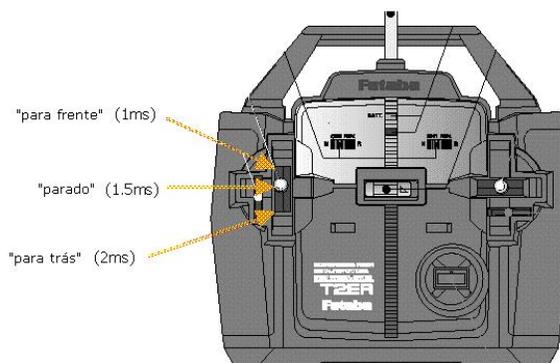


Fig. 22 – Sinais transmitidos do rádio controle de acordo com a posição do manche

3.4 Servos

Os servos são pequenos motores que movem-se confiavelmente para uma posição angular desejada, dada a entrada apropriada.



Fig. 23 – Servos

Cada vez mais estes servos estão sendo utilizados em aplicações diferentes. Isto vem acontecendo devido a diversas características atrativas que este pequeno atuador possui:

- Torque relativamente elevado
- Controle de posição embutido
- Fácil montagem
- Fácil controle
- Econômico

3.4.1 Função básica dos servos

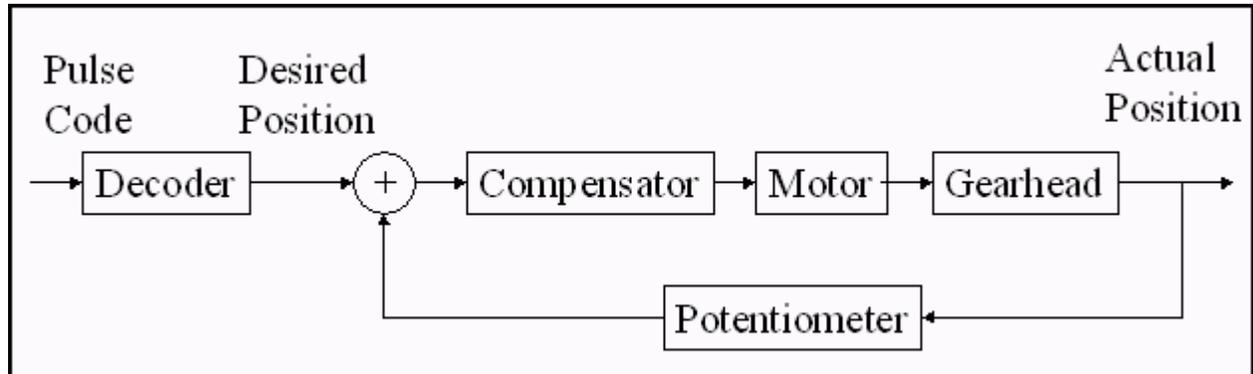


Fig. 24 – Propagação do sinal do rádio controle

Na figura acima encontra-se um diagrama de blocos, ilustrando a idéia básica da função do servo. A posição desejada é comparada à posição de saída do eixo servo. Um compensador ajusta este sinal e ajusta a entrada ao motor. O motor é unido a uma caixa de redução, de modo que a saída tenha um torque elevado, embora com velocidade reduzida. Um potenciômetro é unido ao eixo de saída para fornecer o sinal de realimentação.

3.4.2 Controlando Servos

Na figura abaixo encontra-se o tipo mais comum do conector servo. Ajustes nos pinos padrão de SIPP (*"single in-line pin package"*, encapsulamento de pinos em linha única), e possui três ligações:

- Branco: Sinal
- Vermelho: Potência (Positivo)
- Preto: Terra

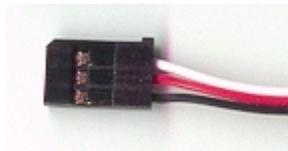


Fig. 25 – Conector servo

Os servos trabalham idealmente na faixa 4V-7V. O sinal é suposto estar em níveis TTL (0 e 5V). Geralmente, os servos funcionam perto de 5V, coincidindo o nível alto de potência com o de sinal. O sinal de controle do servo deve ser como o mostrado na figura abaixo onde, a cada 20ms, um pulso alto novo é emitido. O comprimento deste pulso ajusta a posição do servo. O servo é centrado tipicamente quando o pulso tem largura 1,5ms, continuamente.

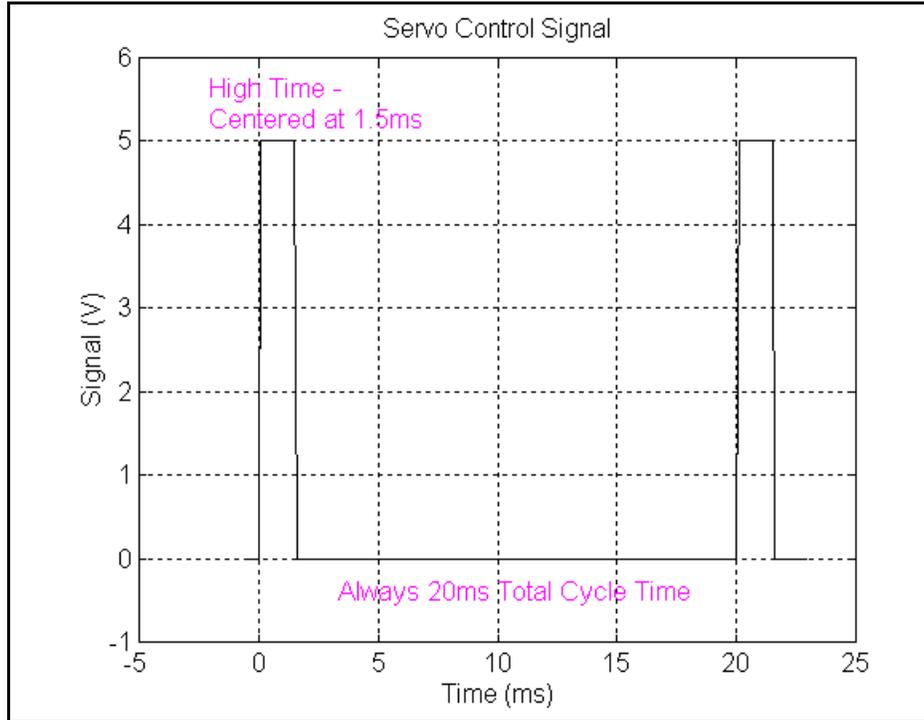


Fig. 26 – Sinal de controle recebido pelo servo

Há muitas maneiras de se gerar este sinal. Na aplicação deste trabalho em específico, este sinal é gerado pelo rádio controle e decodificado pelo receptor, sendo, portanto, o sinal a ser utilizado para controlar não um servo, mas os motores DC.

4. Projeto Eletrônico

A parte eletrônica do projeto concentrou-se em utilizar o sinal de saída do receptor que, como visto anteriormente, é fornecido em forma de pulsos com largura variável entre 1ms e 2ms, para movimentar os motores DC das rodas do robô. Foi necessário fazer uma decodificação deste sinal de modo que, dado um pulso com uma certa largura de entrada, fosse enviada ou não tensão para alimentar os motores, e ainda, o sentido em que esta alimentação se daria, resultando no sentido de rotação destes.

Uma vasta pesquisa foi realizada a fim de desenvolver o circuito. Primeiramente, a pesquisa se concentrou em levantar dados sobre componentes, circuitos e até módulos prontos vendidos no mercado que pudessem ser aplicados no projeto. A partir dessa pesquisa, tomou-se conhecimento dos principais componentes utilizados em aplicações similares, a disponibilidade de encontrá-los no mercado e a sua adaptação às necessidades do projeto.

Diversas idéias e protótipos foram implementados até obter-se uma versão final. Nos itens a seguir, serão relatados passo a passo o desenvolvimento da eletrônica deste robô, com todos os problemas e soluções que foram implementadas em cada etapa desse desenvolvimento.

4.1 Descrição da eletrônica

O projeto eletrônico do robô teve como objetivo o controle de direção dos motores através do uso de controle remoto. Dessa forma seria possível acionar cada roda do robô independentemente para frente ou para trás. Devido às características deste tipo de robô, decidiu-se que não haveria necessidade de se controlar a velocidade de rotação das rodas (que é feito implementando-se um sistema PWM – *Pulse Width Modulation*). Com isso, o controle se concentrou no acionamento das rodas sempre fornecendo a potência máxima e ajustando-as no sentido desejado (horário ou anti-horário).

O motor utilizado, fornecido pela BOSCH, é comumente aplicado no sistema de arrefecimento de automóveis, funcionando acoplado a uma ventoinha. O motor elétrico é da marca GPB, trabalhando com tensão 12V (ver Apêndice 1). Vários testes foram realizados em laboratório para se conseguir traçar as curvas de torque do motor contra amperagem, potência e RPM. Com isso, foi possível saber a rotação (em RPM) onde o motor apresentava a sua potência máxima, correntes de pico alcançadas durante a sua reversão e correntes normais de funcionamento. Os testes foram realizados com o auxílio de um tacômetro digital HOBICO e de um amperímetro.

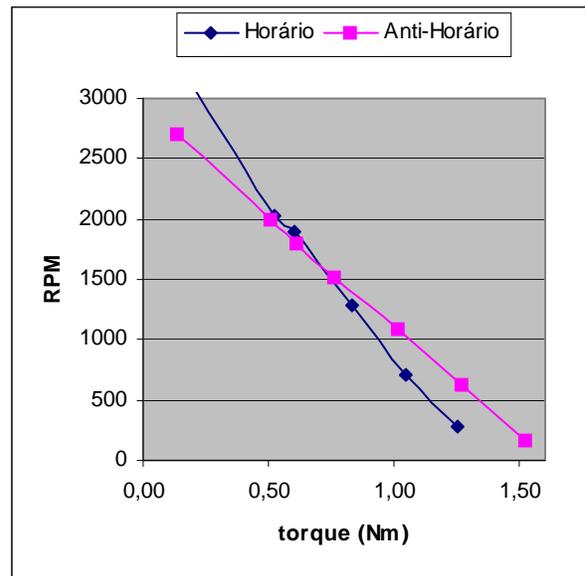
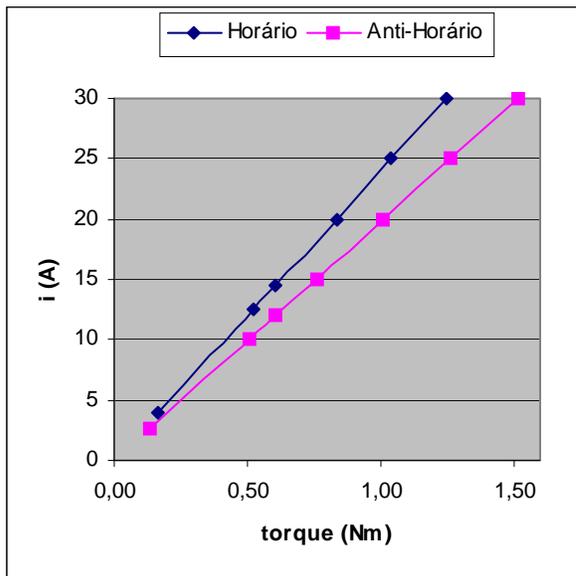


Fig. 27 – Torque estimado versus Corrente

Fig. 28 – Torque estimado versus RPM

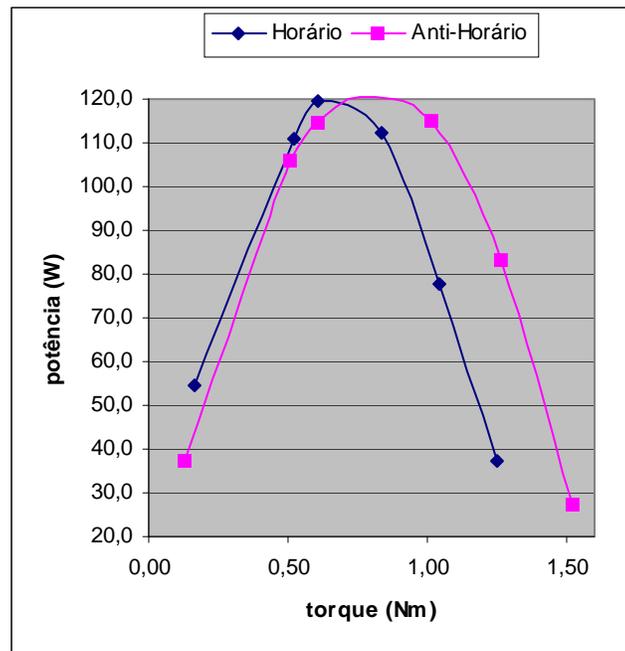


Fig. 29 – Torque estimado versus Potência Mecânica

Como o motor possui avanço de fase, ele não é totalmente reversível, logo existem diferenças na sua resposta para cada sentido de rotação, como visto nos gráficos acima. Através desses gráficos e dos dados obtidos, foi possível montar uma tabela com as principais características deste motor e levantar dados importantes a respeito das correntes que estariam presentes no circuito elétrico que iria controlá-lo.

Tabela 4 – Correntes no motor

	<i>Sentido Horário</i>	<i>Sentido Anti-Horário</i>
$i_{máx} (stall)$	33A	33A
$i (potência mecânica máx)$	14,5A	15A
$i_{pico} (reversão do motor)$	50A	50A

Para controlar a inversão dos motores, usou-se um sistema comumente chamado de “Ponte H” (*H Bridge*, em inglês).

4.1.1 Ponte H

Para reverter um motor elétrico é necessário que se reverta a direção da corrente que passa pelo motor. A forma mais fácil de se conseguir isto é utilizando um circuito denominado ponte H.

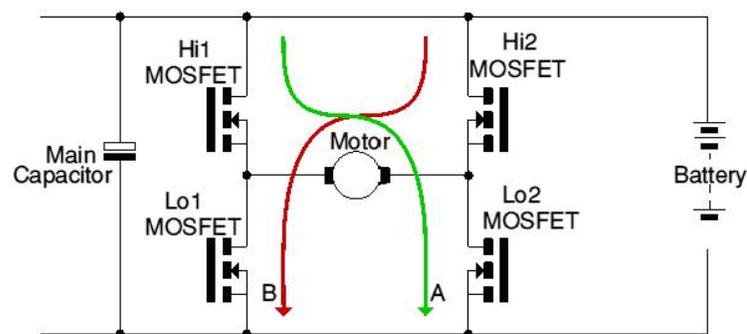


Fig. 30 – Esquema de uma ponte H

O circuito mostra uma ponte H com quatro transistores de potência MOSFETs (a serem explicados mais à frente). Na movimentação para frente, a corrente deve fluir no sentido da seta A do positivo da bateria, com “Hi1” (vide figura 30), através do motor e assim com “Lo2” ao negativo da bateria. Na movimentação reversa, a corrente deve fluir no sentido da seta B.

Logo, para a movimentação para frente, “Hi1” seria permanentemente ligado (em saturação), “Hi2” desligado (em corte), “Lo1” desligado e “Lo2” ligado. Analogamente, para a movimentação para trás, “Hi1” seria permanentemente desligado, “Hi2” ligado, “Lo1” ligado e “Lo2” desligado.

No esquema, os componentes “acionadores” utilizados são transistores do tipo MOSFET. No entanto, outros componentes podem ser usados como acionadores neste tipo circuito, como é o caso dos relés.

4.1.2 Relés

Um relé é um dispositivo elétrico usado para acionar circuitos elétricos de alta potência, controlado por um sinal de baixa potência. Dentro de um relé existe uma bobina eletromagnética e um jogo de contatos elétricos. Quando potência (corrente) é enviada através da bobina do relé, é criado um campo magnético dentro do seu encapsulamento. O campo magnético atrai uma peça metálica conectada a um jogo de contatos elétricos que, por sua vez, estão conectados a outro jogo de contatos fixos, fechando um circuito elétrico e permitindo que a potência flua para a carga. Quando a potência da bobina é interrompida, o campo magnético desaparece e uma mola empurra os contatos móveis para a sua posição original, “quebrando” o circuito.

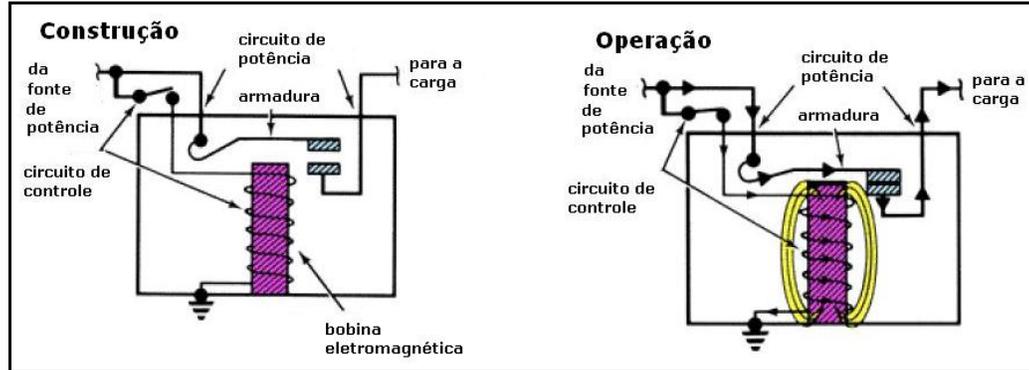


Fig. 31 – Construção e operação do relé

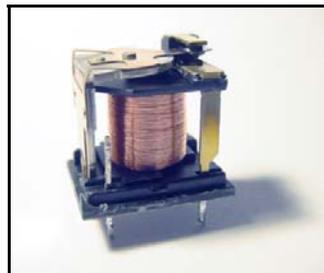


Fig. 32 – Um relé aberto

Relés podem conter um ou mais circuitos. O número de circuitos dentro de um relé é expresso como pólos. Um relé que possui apenas um circuito é chamado de relé de um pólo. Um relé com dois circuitos é chamado de relé de dois pólos.

Relés também compreendem dois tipos de contatos: contatos normalmente aberto (N/A) e normalmente fechado (N/F). Normalmente, contatos abertos não permitem que a potência seja transmitida até que a bobina esteja energizada. Contatos normalmente fechados permitem que a potência seja transmitida quando o relé não está energizado, mas eles bloqueiam a conexão se ele estiver energizado. Muitos relés contêm o sistema N/F e o N/A com um contato em comum (GND) entre eles, de modo que o relé faça um contato e interrompa o outro quando estiver energizado (*double-throw relays – DT*).

Dois fatores importantes que devem ser observados nos relés são a corrente que eles suportam e a voltagem aplicada à bobina. A corrente que o relé é capaz de suportar no seu estado fixo é muito maior que a corrente que ele pode suportar ao mudar de estado, isto é, no chaveamento. Quando um relé abre o circuito com uma corrente passante significativa, um arco elétrico momentâneo é gerado entre os seus contatos quando estes se separam. Esses contatos são designados para suportar uma certa “quantidade” desses arcos. Se o relé for acionado enquanto por ele estiver passando uma corrente maior do que a suportada para esse acionamento, o arco de corrente pode perfurar e corroer os seus contatos. Uma vez danificados, os contatos do relé terão uma área menor para transmitir corrente, fazendo com que eles fiquem mais susceptíveis a danos provocados pelos mesmos arcos na próxima desconexão, prejudicando completamente o seu funcionamento. O constante chaveamento de seus contatos sem deixá-los esfriar também prejudica o seu funcionamento.

Problemas com relés podem gerar situações perigosas nesse tipo de aplicação, fazendo com que o sistema de direção do robô ou a sua própria arma falhem ao tentar ser desligados, gerando riscos. Por esse motivo, a escolha dos relés apropriados deve ser feita com muita cautela. Os principais relés utilizados neste tipo de competição são automotivos, com a tensão da bobina em 12 ou 24V DC, corrente nos contatos de 10 a 60 ampères, e eles possuem normalmente os dois tipos de contatos, N/A e N/F (*double-throw*). Não é aconselhável conectar relés em paralelo para se obter uma capacidade de corrente mais elevada. O fechamento do contato de um relé é um evento lento se comparado ao tempo que a corrente leva para começar a circular pelo motor. Devido às diferenças de fabricação, todos os relés não fechariam os contatos exatamente no mesmo momento, fazendo com que o primeiro relé que fizesse contato (ou o último a cortar o contato no caso de abrir o circuito) recebesse toda a carga passada ao motor sozinho. Portanto, relés ligados em paralelo

podem ser usados de modo seguro somente quando a corrente passante for o bastante para somente um relé atuar sozinho.

Optou-se pelo uso de relés como acionadores da nossa ponte H neste projeto por resultar em um circuito mais simples de ser implementado do que com MOSFETs e por se estar trabalhando com correntes máximas dentro do limite de operação dos relés encontrados no mercado. Mesmo assim, foram tomadas providências para evitar o desgaste mais rápido dos relés, provocado pelos arcos de corrente gerados durante o chaveamento de seus contatos. Para isso, a eletrônica foi separada em duas partes: a parte de sentido, responsável pela decodificação e interpretação do sinal emitido pelo receptor e onde seriam, primeiramente, setadas as posições dos relés de acordo com a rotação dos motores desejadas. A parte de potência, já com os contatos dos relés fixados, seria responsável pela liberação da potência para os motores, reduzindo assim a possibilidade de arcos de corrente nos contatos do relé, aumentando a sua vida útil.

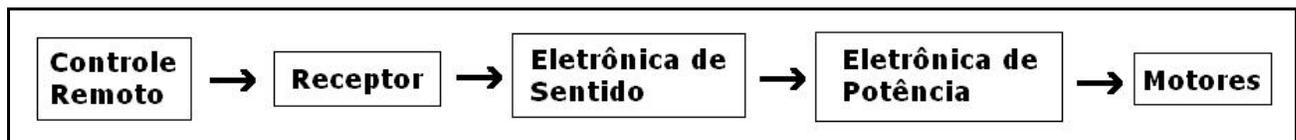


Fig. 33 – Diagrama de blocos do caminho que o sinal percorre até o acionamento dos motores

4.2 Eletrônica de Sentido

Para a eletrônica de sentido, desenvolveu-se um circuito capaz de receber o sinal do rádio, verificar a informação que estaria sendo enviada pelo controle remoto, conectar os relés na posição desejada de acionamento dos motores, e enviar o sinal para ligar a potência.

Primeiramente, deveria-se decodificar a informação emitida pelo receptor. O receptor envia pulsos que variam de 1ms a 2ms, através dos quais é preciso deduzir em qual sentido o motor giraria. Há então duas configurações a setar, de modo que em uma o circuito esteja preparado para acionar o motor no sentido horário e em outra para acioná-lo no sentido anti-horário. Como visto anteriormente, se a largura do pulso recebido for 1ms, a posição do manche no controle corresponde à extremidade inferior e se a largura for 2ms, a posição será a extremidade superior. Se ele estiver centrado, a largura do pulso é 1,5ms. Como há somente dois sentidos e não se está controlando a velocidade dos motores, especificou-se que se a largura do pulso for maior ou igual a 1,5ms, os relés estarão conectados num determinado sentido e se a largura for menor que 1,5ms, os relés estarão conectados na posição inversa.

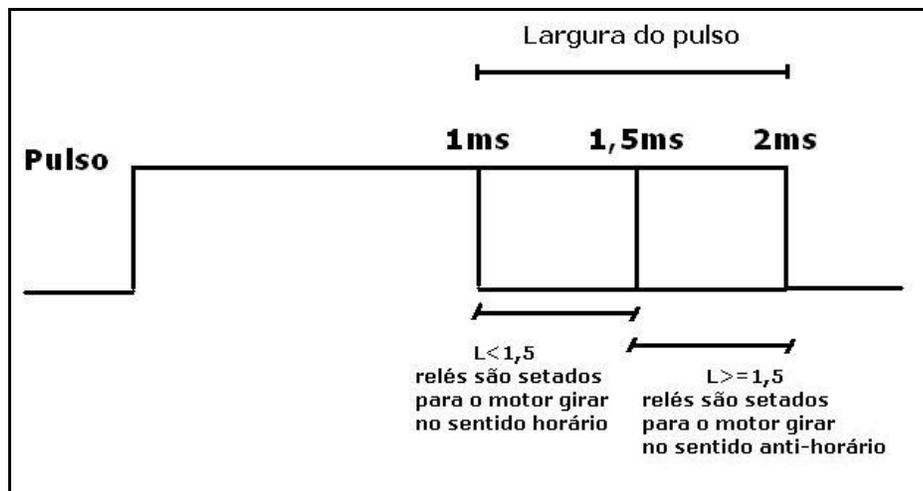


Fig. 34 – Posições assumidas pelos relés de acordo com a largura do pulso lida

O primeiro projeto feito foi um circuito, com o auxílio do software CircuitMaker [1], para decodificar esse sinal. O circuito funcionava da forma descrita a seguir. Um pulso enviado pelo receptor era recebido pelo circuito e, no instante em que ele detectava a presença desse pulso, um

contador decimal (74LS90) começava a contagem. Em paralelo a isso, um oscilador (555) funcionava como *clock* para o contador e estava sincronizado com o pulso, de forma que se o pulso demorasse o tempo máximo (2ms), o contador conseguia contar até 100. Essa informação era armazenada (74LS374) e comparada (74LS85) a números previamente estipulados. Os comparadores comparavam o número fornecido pelo contador com o número estipulado, de forma que se o número do contador fosse maior, a sua resposta estaria em um nível alto (5V) ou se fosse menor, em um nível baixo (0V). Foram usados dois comparadores em configurações opostas, de modo que, se um estivesse em nível alto, o outro estaria em nível baixo, fazendo assim com que a corrente sempre fluísse em um sentido. Dessa forma, se a contagem do contador resultasse em um número baixo, por exemplo, 8, significaria que a largura do pulso era menor do que 1,5ms, uma vez que o contador foi calibrado para contar até 100 (sendo a largura máxima do pulso igual a 2ms). Por outro lado, se a contagem resultasse em, por exemplo, 76, significaria que a largura do pulso era maior que 1,5ms.

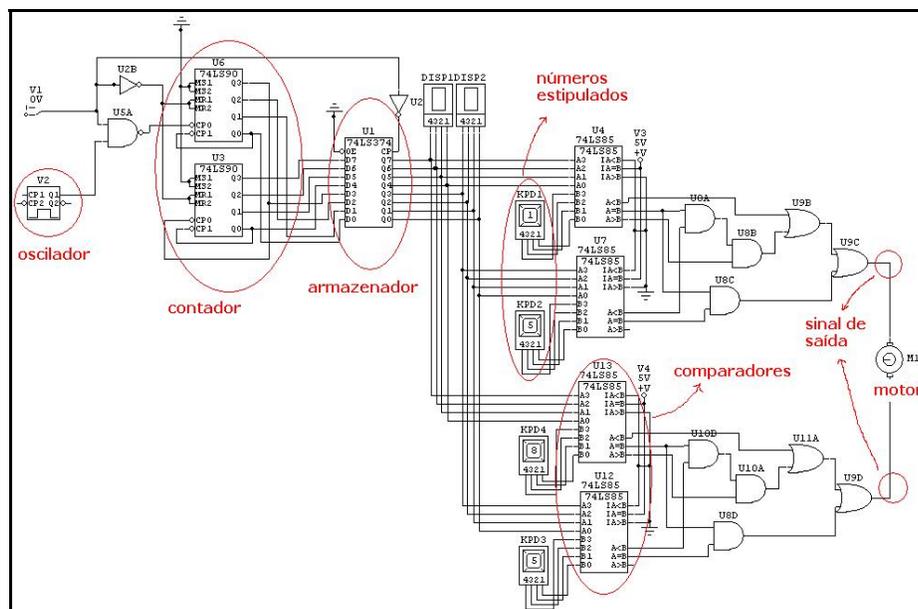


Fig. 35 – Circuito digital decodificador

Esse circuito chegou a ser implementado em *Proto-Board*, funcionando de acordo com as simulações feitas. Porém, ele não chegou a ser utilizado efetivamente na eletrônica devido ao seu tamanho, complexidade de montagem e a não confiabilidade por parte dos sinais transmitidos. A lógica desse circuito foi implementada mais tarde em um microcontrolador PIC, a ser comentado mais à frente.

Os sinais (alto ou baixo) emitidos pelo circuito digital decodificador acima mostrado, conectariam os relés na posição desejada, servindo como entradas de um outro circuito analógico, mostrado na figura 36.

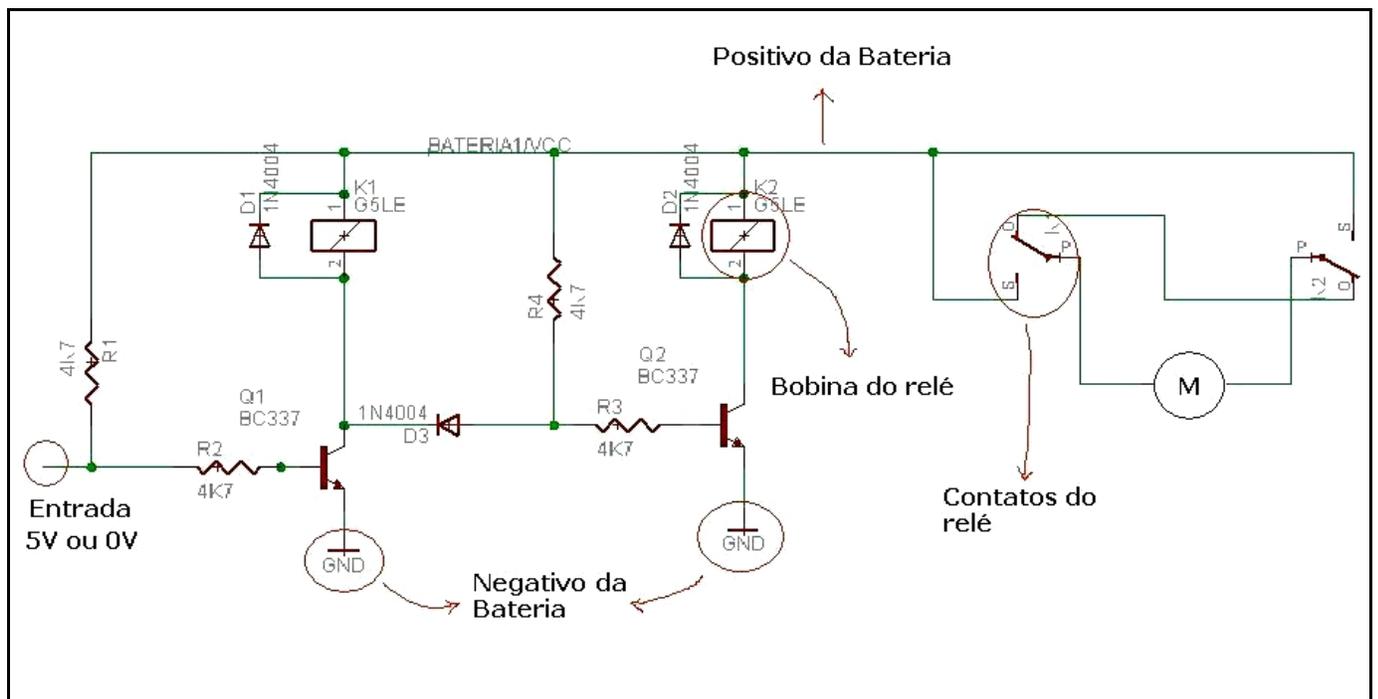


Fig. 36 – Circuito analógico para setar os relés

O circuito acima foi projetado de modo a ter os dois transistores BC337 (Q1 e Q2) trabalhando como chaves analógicas, em corte ou saturação. Na disposição em que eles se encontram no circuito, os relés nunca assumem posições iguais com relação aos seus contatos,

fazendo com que a corrente sempre flua através do motor e não somente pelos contatos dos relés. O circuito funciona recebendo como entrada uma lógica digital TTL (1 ou 0), que, para fins de eletrônica, representam 5V ou 0V. Se em sua entrada estiver 5V, haverá corrente suficiente na base do transistor Q1 a ponto de saturá-lo. Em saturação, Q1 conduz, fazendo com que a corrente flua da bateria e passe pela bobina do relé K1. O diodo D3 não deixará esta corrente passar para Q2, pois estará inversamente polarizado. Isto elimina o risco de ativação de Q2 e garante a independência das partes do circuito, garantindo também que a bobina de K1 será desenergizada quando Q1 entrar em corte. O resistor R3 deve ser alto para impedir uma corrente alta o suficiente para polarizar Q2 que venha diretamente da bateria. Assim, Q2 não recebe corrente em sua base, funcionando como uma chave aberta (em corte) e não deixando a corrente fluir através do relé K2. Dessa forma, temos a bobina de K1 é energizada e a de K2 desenergizada, fazendo com que os contatos de ambos os relés assumam posições diferentes. De uma maneira análoga, se houver 0V na entrada do circuito, Q1 estará em corte, desenergizando a bobina de K1 e Q2 estará saturado, energizando a bobina de K2. Agora ocorrerá a situação inversa à anterior, com K1 desenergizado e K2 energizado, invertendo os contatos dos relés e fazendo com que a corrente passe pelo motor no outro sentido. Os diodos D1 e D2 colocados entre os terminais das bobinas dos relés são para proteção, evitando a corrente provocada pela força contra-eletromotriz, gerada após o acionamento dos mesmos. Dessa maneira, um controle no sentido de rotação do motor é feito, alterando o fluxo da corrente através de seus terminais.

4.3 Eletrônica de Potência

A parte da eletrônica voltada para alta potência se resume em usar um transistor como chave eletrônica, deixando passar ou não a corrente pelo motor. Na primeira aplicação com o circuito de potência, utiliza-se um transistor de potência NPN 2N5038. Este transistor suporta uma corrente no coletor de até 30A de pico, uma voltagem de até 90V, dissipando uma potência de 140W (ver Apêndice 1). Uma vantagem desse transistor vem do seu encapsulamento (TO-3), garantindo uma maior área de contato com o dissipador, dissipando mais o calor produzido. No entanto, a corrente máxima que este transistor suporta é inferior às correntes limites do circuito. No primeiro teste realizado com esse transistor, ele queimou depois de 3 ou 4 acionamentos, como era de se esperar, não suportando a corrente que por ele passava. Uma outra desvantagem deste tipo de transistor é a sua alta resistência interna, fazendo com que uma parte significativa da potência despendida pela bateria ficasse retida nele. O mais recomendado para aplicações deste tipo, de alta potência, lidando com altas correntes, são transistores de efeito de campo, mais conhecidos como FETs (*Field Effect Transistor*, em inglês).

A fim de que o circuito de potência só permita que a corrente passe pelo motor depois que os relés sejam ajustados, configurou-se esse acionamento da eletrônica de potência da seguinte forma. A eletrônica de sentido faz com que os relés sejam ajustados quando detectada uma largura de pulso superior ou inferior a 1,5ms, como visto anteriormente. Sendo assim, a potência só poderá ser fornecida ao motor em situações onde o relé já estiver sido posicionado corretamente. Como garantia, estipulou-se que o acionamento da potência seria feito quando fossem detectadas larguras de pulso superiores a 1,8ms ou inferiores a 1,2ms. Como os relés são ajustados ao redor de 1,5ms,

nesses pontos escolhidos conseguiu-se ter a certeza de que os relés não irão comutar ao mesmo tempo em que estejam conduzindo corrente.

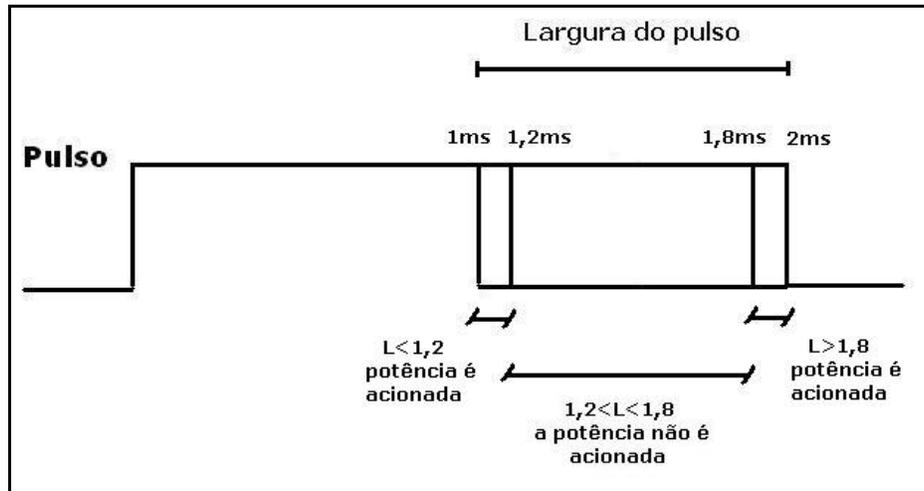


Fig. 37 – Potência é fornecida ou não de acordo com a largura do pulso

O circuito referente à potência ficou da seguinte forma:

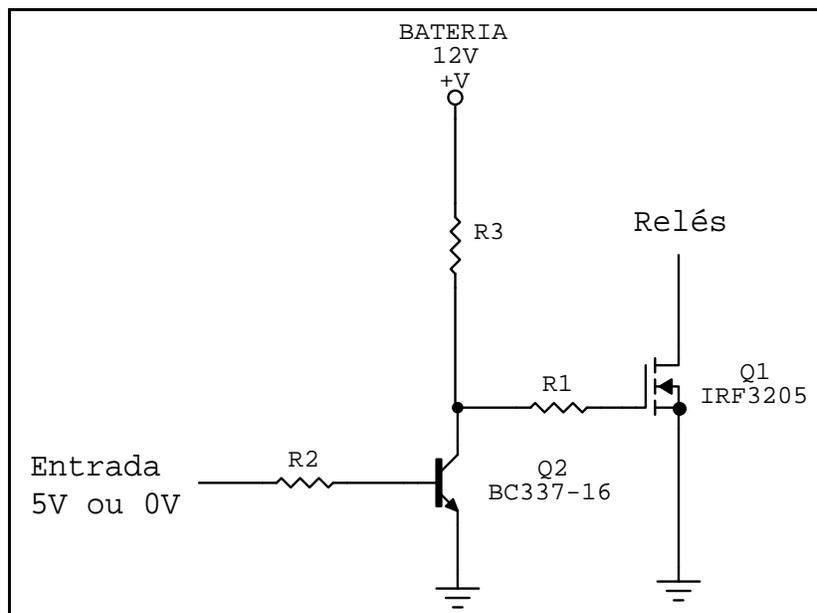


Fig. 38 – Parte de potência do circuito do robô

Como a tensão que é aplicada à porta do FET (IRF3205) é proporcional à resistência interna do mesmo, foi preciso elevar o nível de entrada no FET de 5V para 12V. Para isso, acrescentou-se ao circuito um transistor NPN BC337, fazendo com que o FET seja acionado com os 12V da bateria, reduzindo ao máximo a sua resistência interna. Se houver 5V na entrada do circuito, Q2 na figura ficará saturado, a corrente fluirá da bateria para o terra e então Q1 entrará em corte, pois a tensão da porta será zero. Em contra partida, se houver 0V na entrada, Q2 estará em corte, de modo que a corrente fluirá da bateria para a porta de Q1, fazendo com que este fique saturado. Com isso, foi preciso inverter a lógica de acionamento da potência fornecida pelo PIC, pois 0V faz com que o FET fique saturado, deixando a potência passar pelo motor, e 5V faz com que ele entre em corte, não deixando passar corrente.

4.3.1 FET - Transistores de Efeito de Campo

O J-FET (Transistor de Efeito de Campo da Junção) e o MOS-FET (FET com Semicondutor Metal-Óxido) são dispositivos controlados por tensão. Uma mudança pequena na tensão de entrada causa uma mudança grande na corrente de saída. A operação do FET envolve um campo elétrico que controla o fluxo de uma carga (corrente) através do dispositivo. Em contraste, um transistor bipolar emprega uma corrente pequena da entrada para controlar uma corrente de saída grande. Os terminais do FET chamados de fonte (*source*), dreno (*drain*) e porta (*gate*) são análogos ao emissor, ao coletor, e à base de um transistor bipolar. Os termos canal-n (*n-channel*) e canal-p (*p-channel*) referem-se ao material a que o dreno e a fonte são conectados. Abaixo está o símbolo esquemático para o canal-n e o canal-p do JFET.

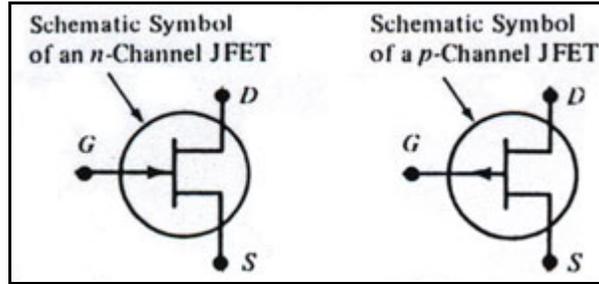


Fig. 39 – Símbolo esquemático dos canais n e p do JFET

Uma construção simplificada do JFET de canal-n é mostrada na figura 39. Note que o dreno e as conexões da fonte estão feitos ao canal-n e a porta está conectada ao material p. O material n fornece um trajeto direto do dreno à fonte. Um JFET de canal-n é construído de modo que o dreno seja positivo em referência à fonte. Em contra partida, um JFET de canal-p com material de porta n seria construído inversamente.

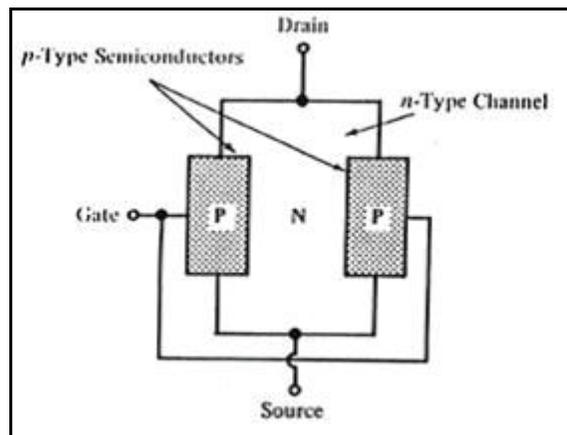


Fig. 40 – Junção FET com material tipo n entre materiais do tipo p

Como com toda junção PN, uma região de depleção é formada, sendo aumentada enquanto a tensão de porta também é aumentada. A camada de depleção é uma espécie de "zona morta" onde

não há espaço para movimentação de elétrons e lacunas, dificultando a passagem de elétrons e reduzindo a corrente do dreno para a fonte no canal.

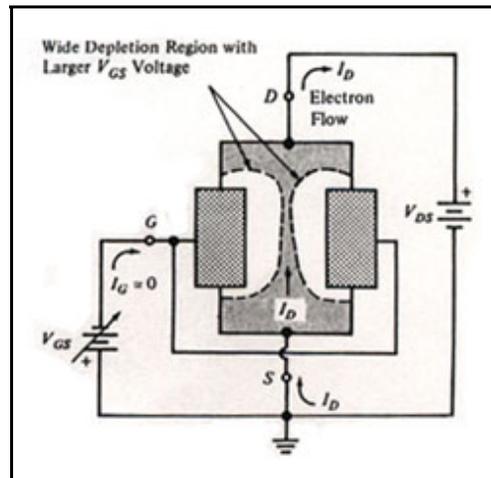


Fig. 41 – Região de depleção com um aumento da tensão V_{GS}

Com isso, a corrente dreno-fonte é controlada pela tensão da porta. A figura 41 mostra uma curva característica típica de MOSFET; observe o efeito da tensão da porta-fonte na corrente dreno-fonte, I_{DS} . Observe também a relação log-linear da corrente do dreno à tensão do dreno de zero a aproximadamente um Volt, antes do JFET saturar. Enquanto a tensão na porta é aumentada, a corrente dreno-fonte também é aumentada.

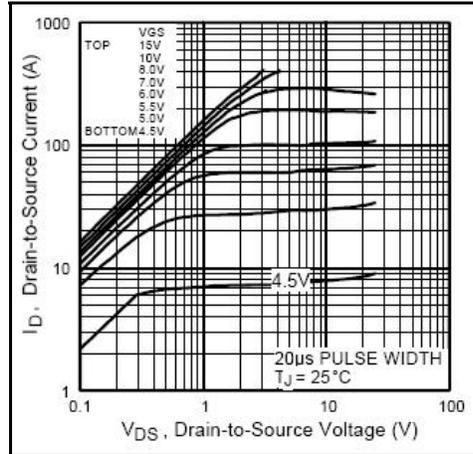


Fig. 42 – Relação entre a corrente dreno-fonte (I_D) e a tensão dreno-fonte (V_{DS}) para cada tensão V_{GS}

Como g_{fs} , que é a relação da corrente dreno-fonte à tensão da porta, chamada de transcondutância de JFET, como com o transistor bipolar, pode haver muitas especificações relevantes, dependendo da aplicação do JFET no circuito. Porém, os parâmetros mais comuns são, em inglês:

Gate source breakdown voltage, BV_{GSS} (Voltagem de ruptura da porta da fonte)

Gate reverse leakage current, I_{GSS} (Corrente reversa de vazamento da porta)

Gate source cutoff voltage, $V_{GS(off)}$ (Voltagem de corte entre a porta e a fonte)

Drain current at zero gate voltage, I_{DSS} (Corrente de dreno a uma voltagem nula de porta)

Forward transconductance, g_{fs} (Trancondutância direta)

Input capacitance, C_{ISS} (Capacitância de entrada)

Switching considerations (Considerações de chaveamento)

Drain-source on resistance, $R_{DS(on)}$ (Resistância dreno-fonte)

4.3.2 MOSFETs

Um FET com um óxido que reveste o espaço entre a porta e o canal é chamado de MOSFET (Transistor de Efeito de Campo com Semicondutor de Oxido de Metal). A figura abaixo mostra o óxido, isolando a porta do canal. Como resultado, o MOSFET tem a resistência de entrada muito elevada, maior que a do JFET e, como com o JFET, a porta controla a corrente principal ou do canal, I_{DS} .

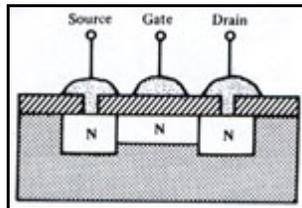


Fig. 43 – Região espessa de óxido separando a porta e o canal

Observe que uma tensão positiva da porta (*gate*) induzirá uma carga negativa no canal-n, realçando a corrente dreno-fonte, I_{DS} ; enquanto que uma tensão negativa na porta induzirá uma região de depleção no canal-n, reduzindo desse modo a corrente dreno-fonte, I_{DS} . Um MOSFET assim construído é denominado de MOSFET de depleção/realce. Uma curva típica do MOSFET de canal-n é mostrada na figura a seguir.

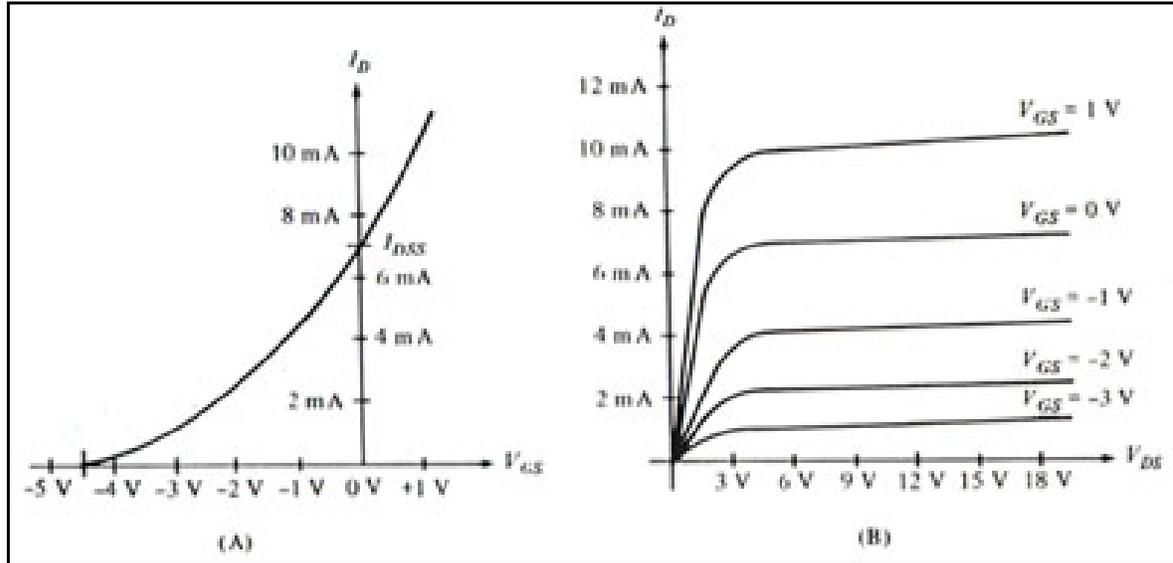


Fig. 44 – Curva típica do MOSFET de canal-n

A figura 39 (a), mostra a transcondutância, G_m , ou efeito da tensão da porta sobre o dreno à corrente da fonte. Observe que a tensão da porta-fonte pode ser positiva ou negativa. Isto não seria possível com um JFET. Na figura 39 (b), pode-se ver o efeito de aumentar V_{GS} em I_{DS} ; pode-se observar também que para toda a corrente de porta dada, a tensão dreno-fonte tem pouco efeito sobre a corrente do dreno acima de 3 volts, desde que o MOSFET esteja na saturação.

O MOSFET é feito também em um modo de realce somente, onde um sinal da porta somente induz ou realça a corrente do canal; o sinal da porta nunca esgota a corrente do canal. Naturalmente, há os MOSFETs de realce de canal-p, onde uma tensão negativa da porta realça a condutividade do canal e MOSFETs de realce do canal-n, onde uma tensão positiva da porta realça a condutividade do canal. Por fim, uma tensão de avaria em dispositivos MOS não depende diretamente do desgaste da junção p-n, mas sim em cima da espessura e da qualidade da avaria do isolamento de óxido. Quando a análise ocorre, o óxido é puncionado e o dispositivo é destruído. As

especificações para MOSFETs ou quaisquer transistores são vastas, e, sendo assim, somente as básicas estão listadas, em inglês:

- *Breakdown Voltages* (Vtagens de ruptura)
- *Forward transconductance* (Transcondutância direta)
- *Drain-source on resistance, $R_{DS(on)}$* (Resistência dreno-fonte)
- *Switching characteristics* (Características de chaveamento)
- *Zero gate voltage drain current, I_{DSS}* (Corrente de dreno a uma voltagem nula de porta)
- *Input capacitance, C_{ISS}* (Capacitância de entrada)

Utilizou-se no circuito deste projeto um *Power* MOSFET IRF3205 (ver Apêndice 1) desempenhando o papel de chave analógica, trabalhando somente nas regiões de corte e saturação. Três das principais características deste componente são a sua alta capacidade de corrente, chegando suportar um $I_{Dmáx} = 110A$, uma resistência interna muito baixa ($R_{DS(on)} = 8,0m\Omega$) e um V_{DSS} máximo de 55V. Contudo, para que o seu desempenho seja satisfatório conforme suas especificações, medidas devem ser tomadas como o uso de um bom dissipador para o calor produzido e de pasta térmica entre o componente e o dissipador. Qualquer descuido com relação à montagem do componente pode resultar na não dissipação suficiente do calor produzido, aumentando assim a sua resistência interna e levando o componente à queima. É importante ficar atento também às restrições de potência do componente devido ao seu encapsulamento, uma vez que este último é quem na verdade limita as capacidades do mesmo.

4.3.3 Mecanismos de falha dos MOSFETs



Os MOSFETs são conhecidos por apresentarem falhas aparentemente inexplicáveis - como efeito que a expansão alternativa do acrônimo do MOSFET é “*Magically Obliterated, Smoke and Fire Emitting Transistor*”. A verdade é que os MOSFETs são extraordinariamente robustos, mas que falham certamente muito rápido se alguma de suas capacidades for excedida.

É sempre muito difícil estar absolutamente seguro do que exatamente causou uma falha: o problema é que as falhas são muito difíceis de se promover em todo controlador bem projetado. Além disso, uma vez que um MOSFET falha, prontamente uma outra modalidade também falha, escondendo a evidência original. Seguem abaixo alguns tipos de falhas que podem ocorrer:

- **Falha Avalanche:** se a tensão de operação máxima de um MOSFET for excedida, este entra na falha avalanche. Isto não é necessariamente destrutivo. As especificações do MOSFET indicarão a energia máxima que o MOSFET pode ter na modalidade avalanche. Se a energia do transiente da sobretensão estiver acima do nível de energia que ele suporta no avalanche, a seguir o MOSFET falhará. O dispositivo falha, inicialmente, com nenhum sinal externamente visível. O problema com esta modalidade de falha é que, uma vez que ocorre, há uma provável reação em cadeia que desintegrará provavelmente o MOSFET, apagando a evidência e fundindo provavelmente outros dispositivos.

- **Falha dV/dt :** o que causa é um ponto transiente muito rápido de alta tensão. Se tal ponto começar no dreno de um MOSFET, ele fica acoplado com a capacitância interna dos MOSFETs à porta. Se bastante energia for acoplada, a tensão na porta levanta-se acima do nível permitido máximo, e o MOSFET falha instantaneamente.
- **Ruído do motor:** ruído no motor também pode causar falhas nos FETs. As principais causas de ruídos no motor são:

→ Escovas e comutador gastos;

→ Sujeira, especial sujeira metálica;

→ Motor obstruído;

→ Excesso de voltagem aplicada ao motor.

Para solucionar estes problemas, sugere-se:

→ Cuidados com o motor, manutenção em geral;

→ Redução do ruído do motor, colocando um capacitor cerâmico de 10nF através das escovas do motor. Estes capacitores devem estar o mais perto possível, idealmente dentro, do motor.

→ Uma boa fiação pode ajudar a impedir o ruído que sai de trás do motor e vai até o controlador.

- **Geração de calor em excesso:** o processo depende de como o calor é distribuído. Um caso típico é denominado de “cozinhar sentado”. Neste caso, o MOSFET começa a ficar quente o

bastante a ponto de dessoldar-se literalmente. Muito do aquecimento do MOSFET devido a correntes elevadas está nas ligações, que podem se dessoldar completamente sem a falha do MOSFET. Se o calor for gerado no chip, então ele ficará quente, mas a sua temperatura máxima é geralmente restrita pela fabricação e não pela restrição do silicone. O chip de silicone é ligado à carcaça por uma solda macia e é fácil de derreter e infiltrar-se entre o epoxy e o metal do corpo, formando gotas de solda. Isto pode não destruir o chip.

- **Corrente em excesso:** corrente em excesso através de um MOSFET pode causar sua falha. Exatamente como será a falha dependerá de quão alta será a corrente adicional e durante quanto tempo ela irá fluir. Ao sobrecarregar ligeiramente um MOSFET, ele ficará muito quente. Ao não remover o calor, o MOSFET irá derreter completamente. Em 60 ampères, as ligações em um TO220 (a carcaça mais comum do MOSFET e a que o MOSFET da aplicação deste trabalho possui) começarão a se dessoldar. No entanto, a corrente necessária para isso depende de por quanto tempo as ligações permanecerão e quão grande é a área de trilha em que eles estão soldados. Além disso, os fios internos (que carregam a corrente do externo e conduzem até o chip) podem se fundir em um instante e explodir, provavelmente lançando um fragmento de epoxy a uma alta velocidade. MOSFETs com crateras não são incomuns, mas é difícil definir se o motivo da explosão foi do fio ou do chip, pois ambos parecem ocorrer em harmonia.



Fig. 45 – MOSFET que explodiu devido à alta corrente durante os testes

O circuito completo da eletrônica encontra-se no Apêndice 2.

4.4 Implementação

É muito comum, em projetos, soluções que funcionam muito bem no papel mas que na hora de colocá-las em prática tornam-se inviáveis, decorrente de vários aspectos inesperados. Foi o que aconteceu com o circuito digital projetado para a eletrônica de sentido. O circuito realmente funcionava, pesquisas feitas sobre o assunto revelaram soluções extremamente parecidas com a que havia sido desenvolvida, porém a sua implementação seria muito complexa, gastando-se muito tempo e extremamente passível a dar problemas futuros, que poderiam ser gerados por ruídos externos, soldas frias, componentes queimados, dentre outros. É muito importante em aplicações deste tipo procurar soluções confiáveis e sempre tentar seguir o caminho da simplicidade.

Partiu-se então para a implementação da lógica do circuito digital em um microcontrolador PIC 16f84A (ver Apêndice 1).

Um microcontrolador é de uma forma simplificada um “computador em miniatura”.

Abaixo algumas de suas principais características são descritas:

- Os microcontroladores são usados dentro de outros dispositivos (freqüentemente um produto) de modo que possam controlar as características ou ações do produto.
- Os microcontroladores são dedicados a uma tarefa e executam um programa específico. O programa é armazenado em ROM (memória de leitura apenas) e geralmente não muda.
- Os microcontroladores são freqüentemente dispositivos de baixa potência. Um computador desktop quase sempre ligado em uma tomada pode consumir 50 watts de eletricidade. Um microcontrolador operado por bateria pode consumir 50 miliwatts.
- Um microcontrolador possui um dispositivo de entrada dedicado e em muitas das vezes (mas não sempre) um pequeno LED ou um display de cristal líquido (LCD) para a saída. Um microcontrolador também verifica a entrada do dispositivo que está controlando e controla o dispositivo emitindo sinais aos diferentes componentes do dispositivo.
- Um microcontrolador é geralmente pequeno e de baixo custo. Os componentes são escolhidos de forma a minimizar o seu tamanho e baratear ao máximo o seu custo.

Por exemplo, existe um microcontrolador dentro de uma TV que verifica a entrada do controle remoto e da saída do que é exposto na tela. O controlador controla a seleção de canais, o sistema de alto-falantes e determinados ajustes na eletrônica do tubo da TV tal como o tom e o brilho das imagens. O controlador do motor de um carro verifica os sinais de sensores tais como o do nível de oxigênio e os sensores de batidas, e controla variáveis como a mistura do combustível e o tempo de acionamento das faíscas das velas. Um controlador de microondas verifica a entrada de

um teclado, mostra a saída em um display LCD e controla um relé que liga e desliga o gerador de microondas.

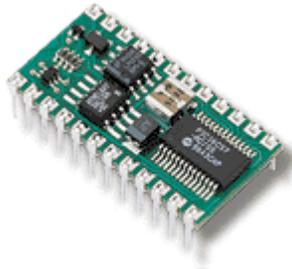


Fig. 46 – Microcontrolador PIC

Enfim, um controlador possui pinos de entrada, pinos de saída, pinos de configuração e pinos de alimentação. Dada uma entrada recebida, o controlador a interpreta de acordo com uma lógica pré-gravada na sua memória e fornece uma resposta a essa entrada na sua saída. Como há dois motores independentes no robô deste projeto, foram precisos dois canais no controle remoto para acioná-los. Utilizou-se ainda um terceiro canal para ligar e desligar o robô pelo controle, mas que não foi implementado. Abaixo, a lógica utilizada no microcontrolador utilizado é descrita:

Pinos de Entrada:

Pino 17 – RA0; controle liga/desliga

Pino 18 – RA1; controle do motor 1

Pino 1 – RA2; controle do motor 2

Pinos de Saída:

Pino 6 – RB0; liga/desliga (não foi implementada no circuito)

Pino 7 – RB1; sentido do motor 1

Pino 8 – RB2; potência do motor 1

Pino 9 – RB3; sentido do motor 2

Pino 10 – RB4; potência do motor 2

Rotina Motor 1:

1. *Lê RA1;*
2. *Verifica L (largura do pulso);*
3. *Se $L \geq 1,5$ então $RB1 = 1$; se não, $RB1 = 0$;*
4. *Se $1,2 < L < 1,8$ então $RB2 = 1$; se não, $RB2 = 0$; (lembrar que a lógica está invertida)*
5. *Volta para 1*

Rotina Motor 2:

1. *Lê RA2;*
2. *Verifica L (largura do pulso);*
3. *Se $L \geq 1,5$ então $RB3 = 1$; se não, $RB3 = 0$;*
4. *Se $1,2 < L < 1,8$ então $RB4 = 1$; se não, $RB4 = 0$; (lembrar que a lógica está invertida)*
5. *Volta para 1*

Essa programação foi implementada em linguagem *Assembly*, e o código fonte do programa encontra-se no Apêndice 1, (sobre o funcionamento e programação de PIC's, ver [9]).

As dificuldades na implementação da parte de potência deveram-se mais às correntes elevadas que tinham que ser suportadas pelo circuito. Por esse motivo, vários circuitos tiveram que ser montados e testados até se chegar a um que tivesse capacidade para suportar a potência produzida.

Os circuitos produzidos eram primeiramente desenhados em CAD, utilizando-se o programa EAGLE [4], onde os esquemas dos circuitos eram inicialmente montados, partindo destes para o desenho do *layout* do circuito na placa de cobre, para a posterior confecção dos mesmos, utilizando para isso uma Máquina Frezadora, específica para a produção de protótipos de circuitos impressos. Nos itens a seguir, serão expostos os protótipos feitos, com os problemas e aperfeiçoamentos realizados em cada um, até se chegar a uma versão final.

Todos os esquemas e desenhos dos circuitos produzidos se encontram no Apêndice 2.

4.4.1 Versão 1

A primeira versão da placa de circuito impresso montada contava somente com os componentes necessários para o controle de um motor e, mesmo assim, somente a parte de sentido. Foi o primeiro contato prático com o circuito a fim de que fosse testada a sua funcionalidade, uma vez que não seria possível usar placas de montagem (conhecidas como *Proto-Board*) para esse teste, pois este tipo de placa não suporta correntes elevadas.

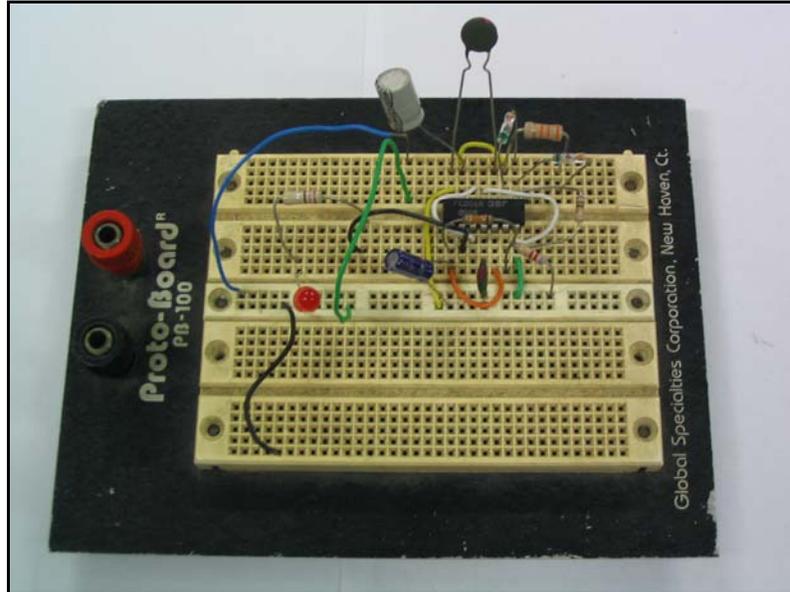


Fig. 47 – Circuito montado em uma Proto-Board

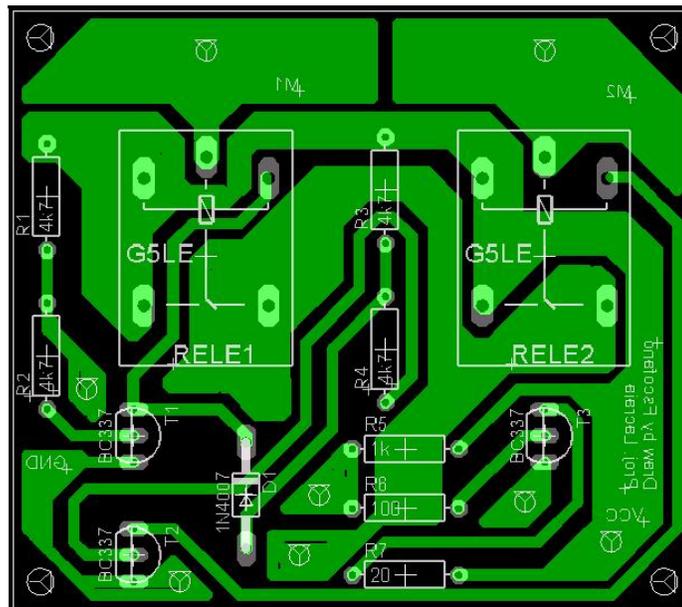


Fig. 48 – Layout da placa versão 1

Os testes realizados com a placa foram bem sucedidos. O acionamento dos relés foi realizado manualmente, aplicando tensão (5V ou 0V) na entrada do circuito e se deu de maneira

correta, não apresentando problemas. Neste teste, utilizamos relés da Metaltex 12 Volts foram utilizados (ver Apêndice 1), com capacidade de corrente máxima para comutação nos seus contatos de 12A. Como não foi colocada carga no motor, não houve problemas com a potência, uma vez que os motores utilizados consomem uma corrente por volta de apenas 3A sem carga.

4.4.2 Versão 2

Na segunda versão, duas placas foram elaboradas; uma destinada ao circuito de sentido, com dois circuitos para o controle de dois motores, e a outra à parte de potência, contendo somente o circuito dos FETs. Mesmo tendo feito uma placa só para os FETs, ainda passava potência pela suposta placa de sentido, pois os relés estavam acoplados a ela. A parte da eletrônica de sentido já havia sido testada funcionou corretamente. A parte de potência é que era a incógnita, pois não se sabia se as trilhas da placa de cobre iriam suportar a potência exigida pelo motor, que dessa vez foi testado com carga. Problemas obtidos com a parte de potência da placa versão 2 são descritos a seguir:

- As trilhas do circuito por onde passa corrente alta foram cobertas com solda, com o objetivo de aumentar a sua área, suportando assim correntes mais elevadas. Mesmo assim, a corrente “puxada” pelo motor com carga fez com que a solda que estava nas trilhas derretesse, fazendo ela se espalhar pelo circuito e rompendo as trilhas (pois elas “perdiam” a solda).
- Os relés usados foram os mesmos usados na versão 1, com capacidade para suportar correntes de no máximo 12A. Eles não chegaram a queimar, porém, na reversão do motor

(que é a parte que mais sacrifica o circuito, gerando picos de corrente de até 50A) eles apresentaram um elevado “*bouncing*” nos seus contatos. Como a corrente que passara pelo relé era maior que a sua capacidade, a força eletromagnética que atraía os contatos não era grande o suficiente para mantê-los nesta posição, gerando um chaveamento rápido e constante de seus contatos durante esse intervalo de reversão, provocando arcos de corrente. Isso diminui a sua vida útil e pode levar à queima.

- Os dissipadores usados nos FETs eram muito pequenos e não conseguiam dissipar todo o calor por eles produzido, levando à queima dos componentes.

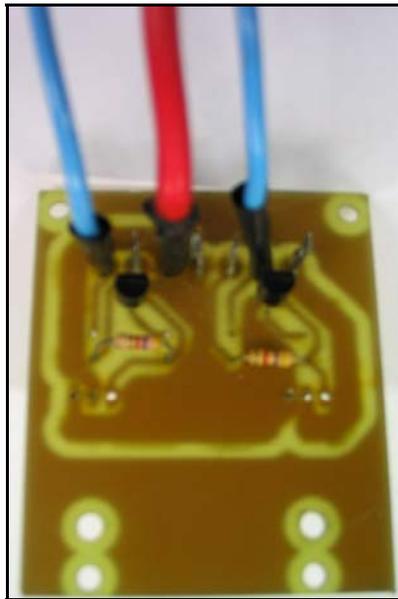


Fig. 49 – Placa versão 2, de potência sem os FETs, que foram reaproveitados

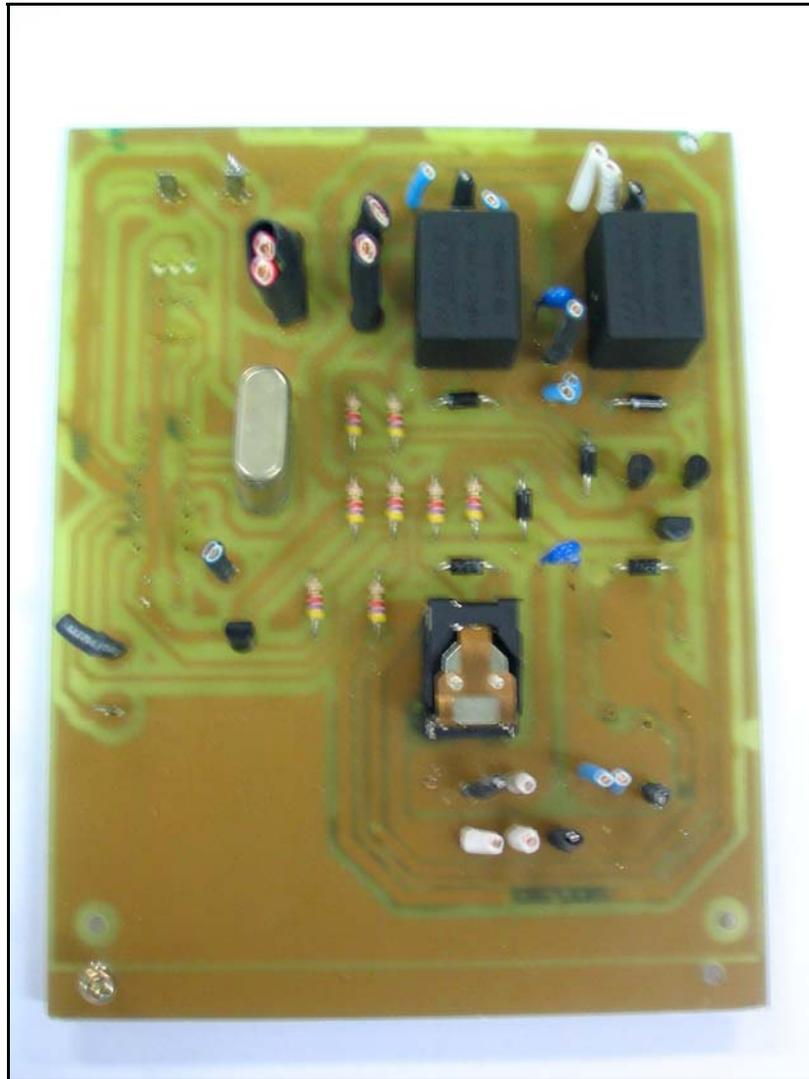


Fig. 50 – Placa versão 2, sem alguns componentes que também foram reaproveitados

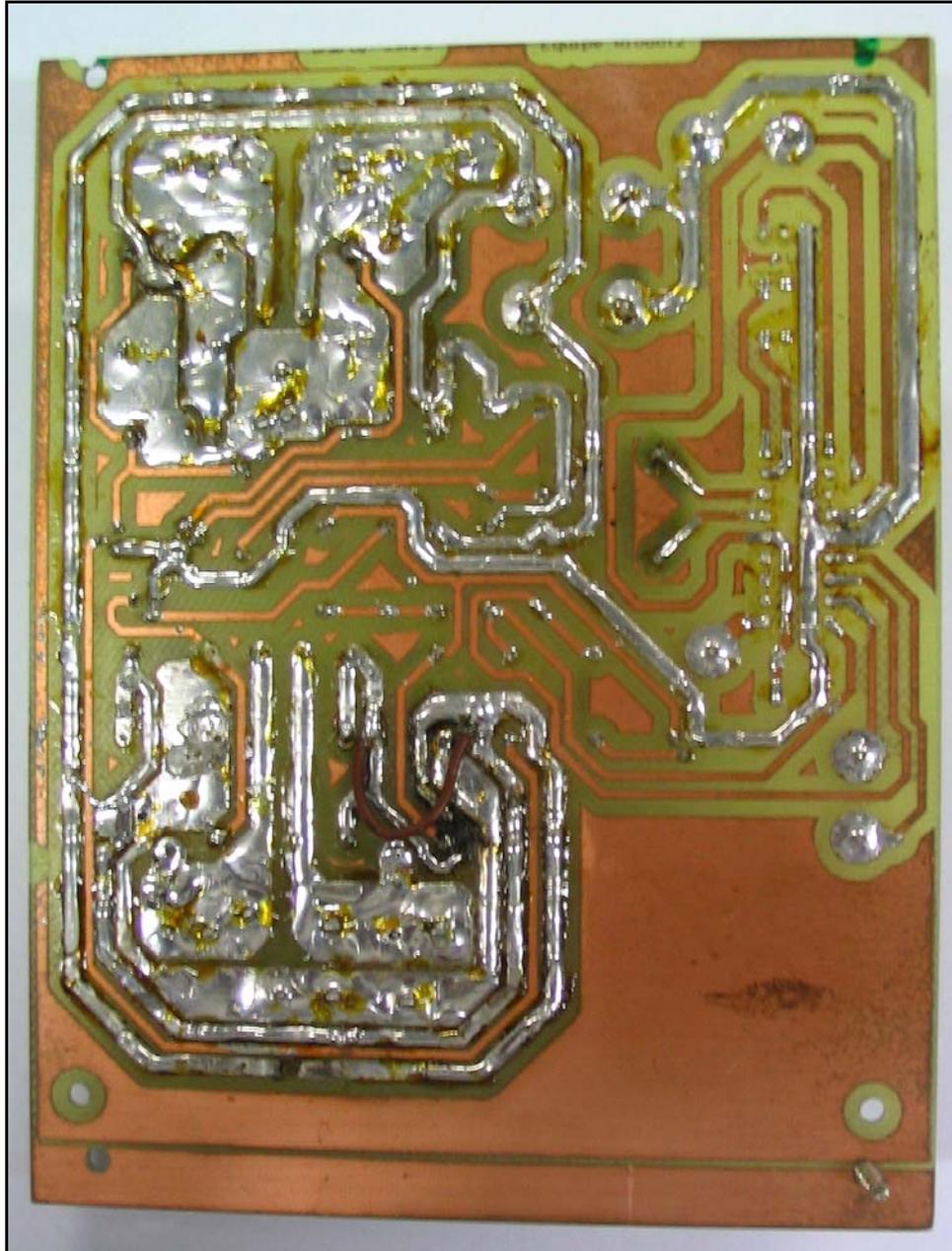


Fig. 51 – Parte de baixo (bottom) da placa versão 2, com solda nas trilhas por onde passava potência



Fig. 52 – Problemas provocados pela alta corrente

4.4.3 Versão 3

Para a versão 3, que foi o circuito levado junto com o robô para a competição, foram feitas melhorias significativas com relação à versão 2, porém, houve muito pouco tempo para testá-la e novamente surgiram problemas com a parte de potência.

Decidiu-se separar completamente todos os componentes relacionados à potência dos demais. Quando a potência era acionada, a corrente fluía do positivo das baterias, passando pelos relés, motores, FETs até chegar no negativo das mesmas. Portanto, esses componentes teriam que ser montados separadamente.

As placas de circuito impressas produzidas não suportavam altas correntes, pois a espessura do cobre era muito fina e havia limitações de tamanho das placas, não permitindo trilhas mais largas. Sendo assim, optou-se pelo uso de fios para fazer as ligações de potência. Utilizaram-se fios usados em equipamentos de áudio, bem flexíveis, com área da secção de 6mm^2 . Este fio tem por volta de 10AWG (padrão americano – ver Apêndice 1) e suporta em torno de 65A de corrente.

Os relés antigos foram substituídos por relés automotivos SC1RC2 (ver Apêndice 1), também da Metaltex. Os novos relés também funcionavam com uma tensão de 12V nas bobinas e suportavam correntes de até 50A. Como somente os picos de corrente do circuito atingiam em torno desse valor, a capacidade deste relé estava de acordo com os limites de corrente do circuito.

Os dissipadores dos FETs foram trocados por outros de maior tamanho, aumentando assim a sua área para troca de calor. O uso de pasta térmica entre o corpo do FET e o dissipador também foi importante para melhorar a área de contato entre as duas partes, preenchendo pequenos espaços vazios devido às imperfeições nas superfícies de contato.

O PIC era alimentado com 5V vindos de 4 pilhas pequenas (AA). Optou-se por uma alimentação separada para evitar possíveis problemas causados pela instabilidade da carga fornecida pelas baterias de 12V com o acionamento dos motores.

Uma chave LIGA/DESLIGA de segurança externa foi implementada ao corpo do robô, exigida pela competição, para que se pudesse interromper o funcionamento do robô em caso de pane elétrica. Essa chave foi ligada diretamente aos terminais porta (*gate*) dos FETs, pois a corrente puxada nesses terminais é pequena, não necessitando de chaves que suportem altas correntes.

Um fator **fundamental** é fazer o isolamento de todo o circuito, não deixando este estar em contato com nenhuma parte metálica, evitando possíveis curtos.

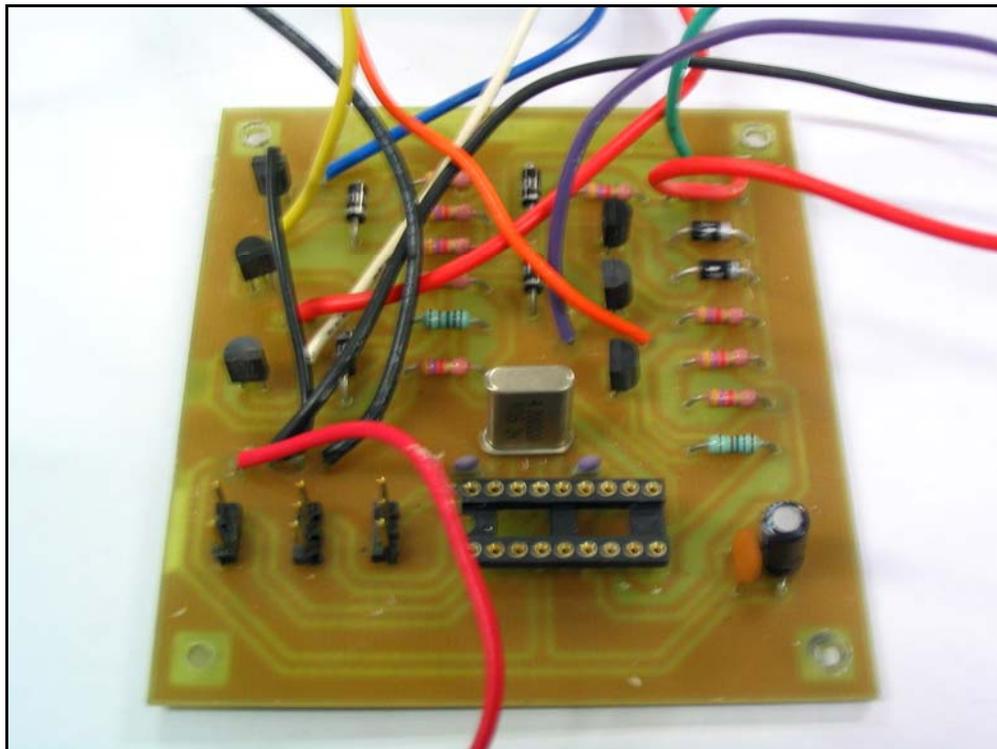


Fig. 53 – Placa versão 3 (sinais de baixa potência)

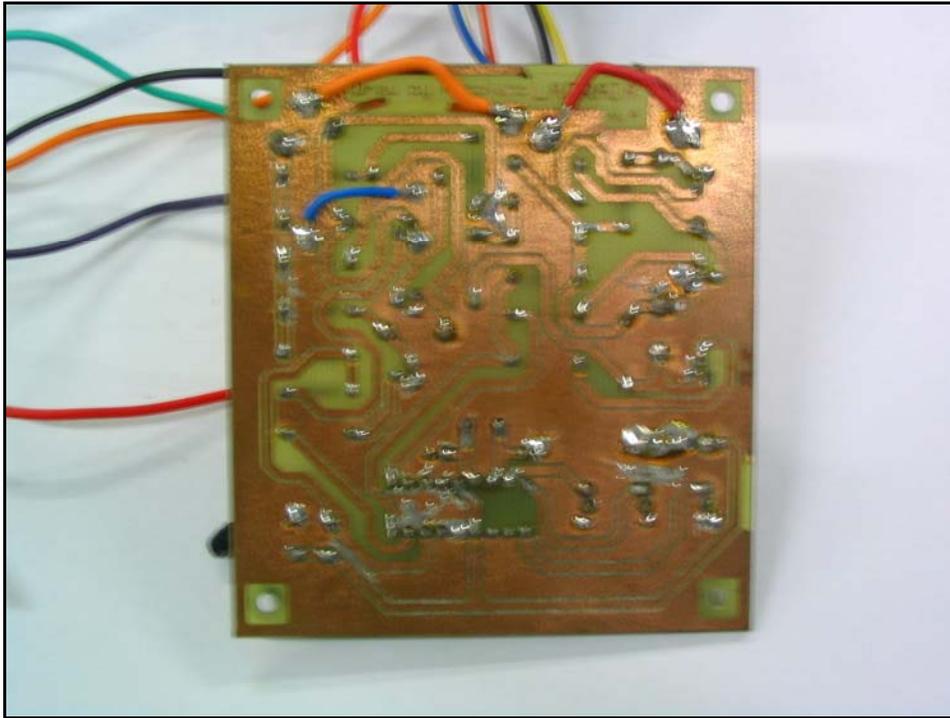


Fig. 54 – Placa versão 3 (bottom)

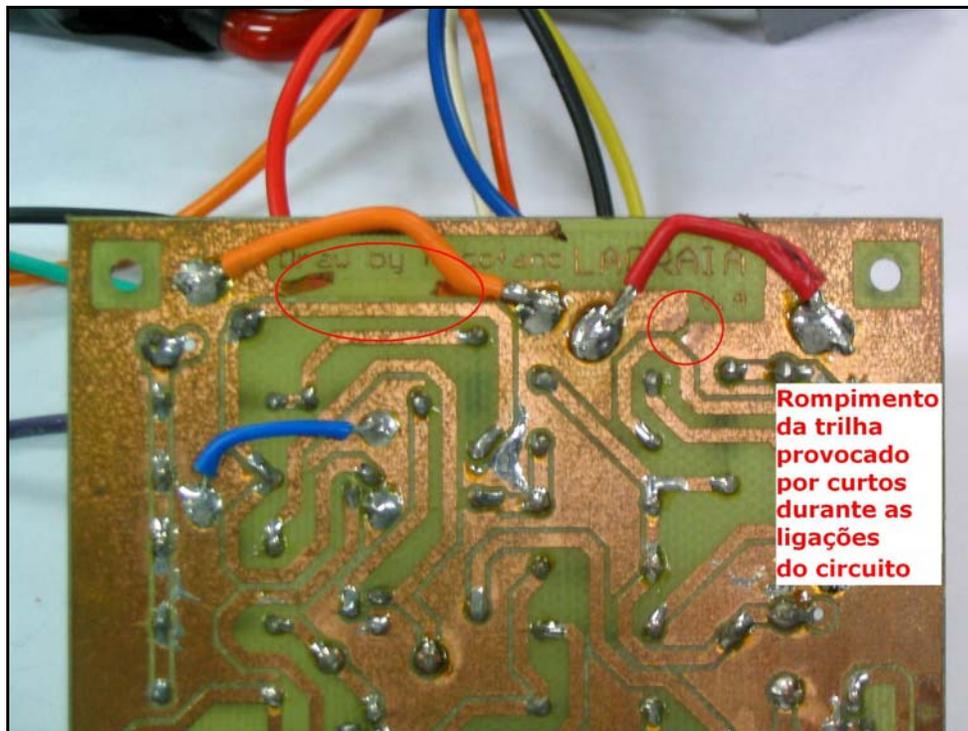


Fig. 55 – Trilhas arrebitadas

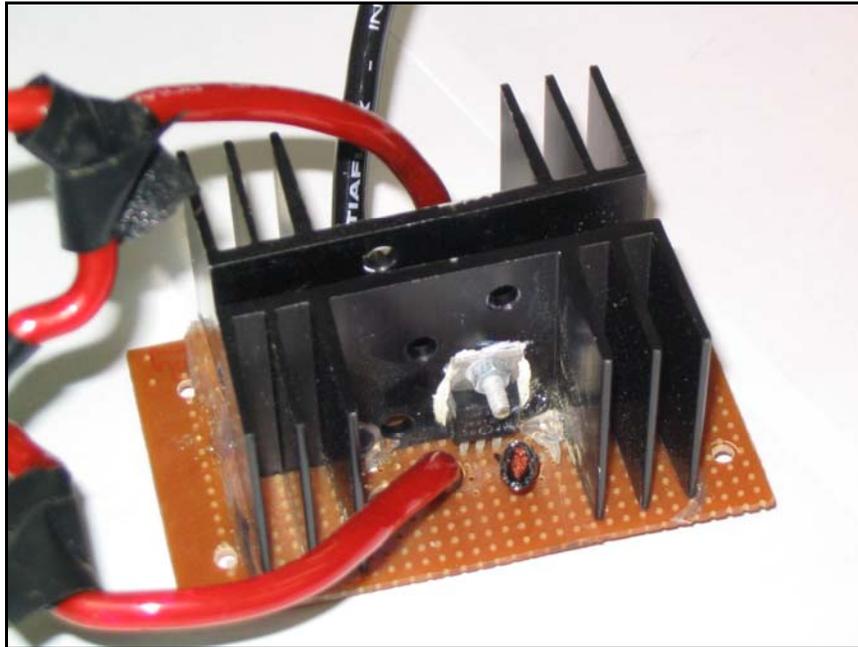


Fig. 56 – Placa de potência dos FET's com os dissipadores

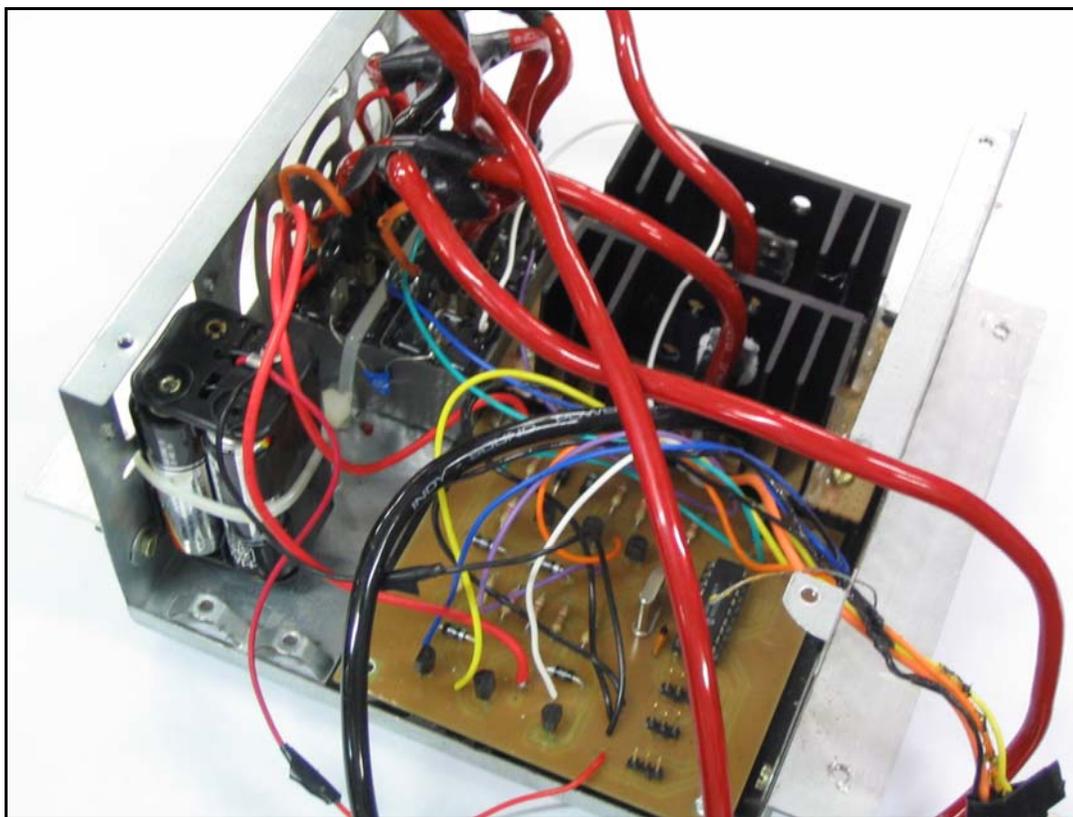


Fig. 57 – Caixa da eletrônica completa, com todas as placas

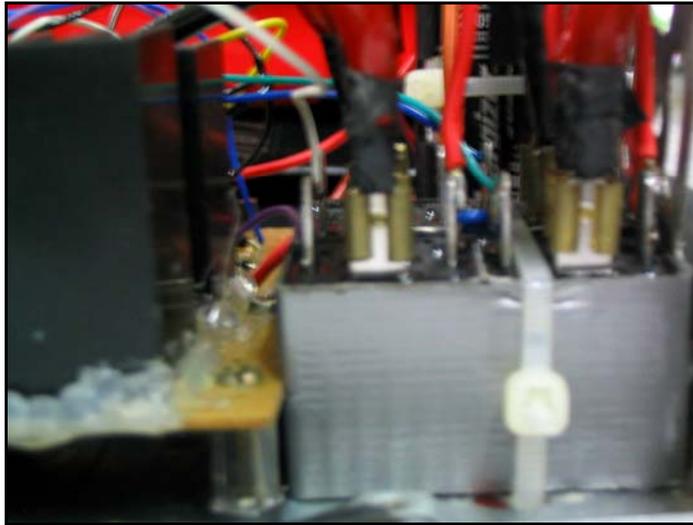


Fig. 58 – Parte de trás da caixa, com o detalhe dos relés

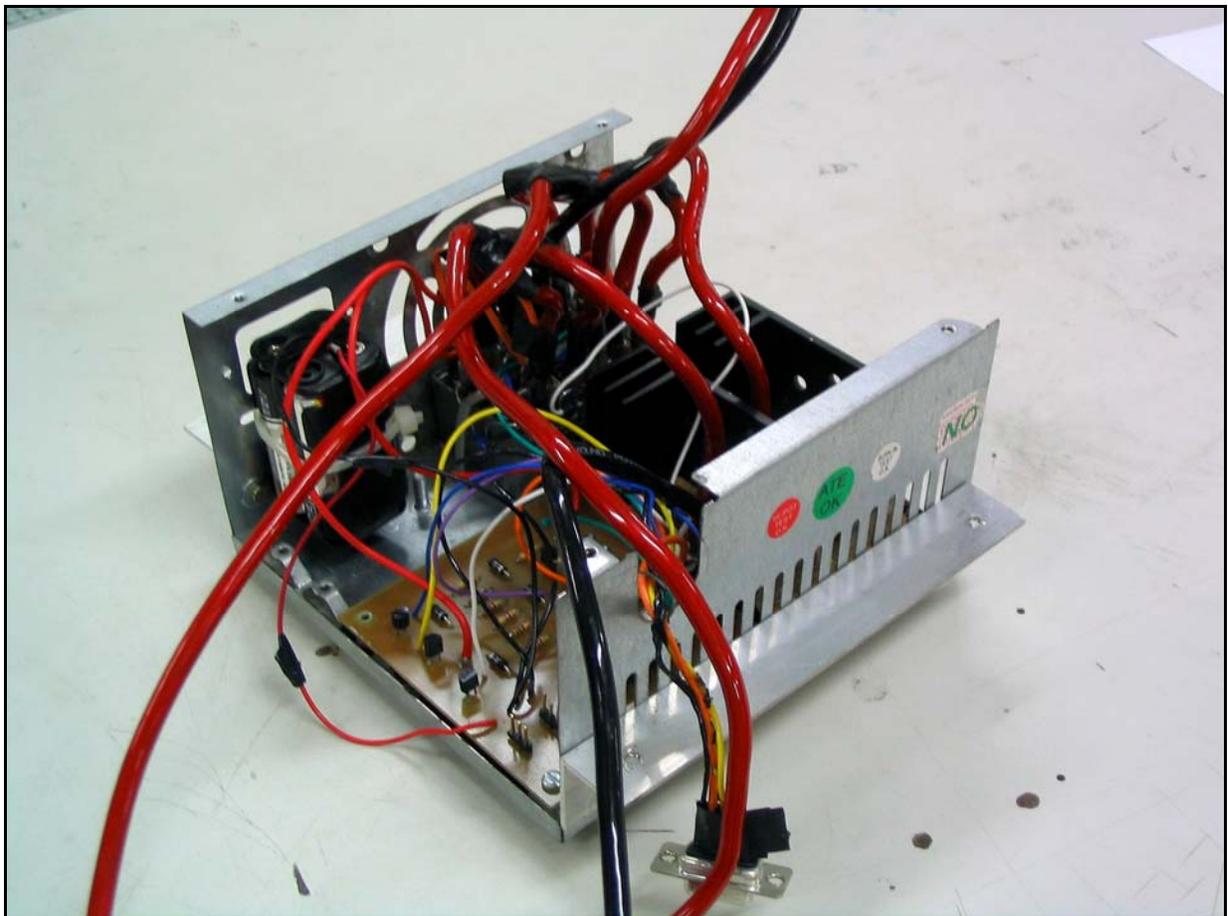


Fig. 59 – Eletrônica versão 3

Os problemas ocorridos na competição com esta versão 3 foram:

- Curtos-circuitos ao ligar os fios da bateria à eletrônica. Como o corpo inteiro do robô é metálico, ao ligar o terra da bateria na eletrônica primeiramente e encostar o fio positivo no corpo metálico, um curto era gerado, rompendo trilhas na placa de sinais e interrompendo o funcionamento do circuito. Alguns sistemas eletrônicos foram queimados até constatar-se esse problema e tomar-se os devidos cuidados.
- Os FETs funcionaram melhor do que na versão dois, pois a montagem estava aprimorada e o calor produzido estava sendo melhor dissipado. Contudo, as mudanças não foram suficientes para evitar por completo o aquecimento e a consequente queima desses componentes. Havia somente um FET por motor, ou seja, além de sobrecarregá-lo, havia o problema da falta de redundância.

Portanto, muitos testes devem ser realizados com antecedência, visando conhecer e corrigir problemas inesperados como estes.

5. Projeto Final (Versão 4) e Resultados

O projeto final da eletrônica do LACRAIA consistiu na correção dos problemas descritos acima. A parte de sinal (baixa potência) da eletrônica funcionou muito bem e continuou inalterada. O projeto da parte de potência foi totalmente refeito a fim de solucionar todos os problemas que apareceram. A principal mudança foi a redundância de FETs usados para acionar cada motor. Ao invés de um, o projeto final contou com quatro FETs para acionar cada motor, ligados em paralelo.

5.1 Paralelismo de MOSFETs

Os MOSFETs podem ser colocados em paralelo para melhorar a potencialidade de manipulação da corrente. Basta simplesmente acoplar os terminais da porta, da fonte e do dreno. Qualquer quantidade de MOSFETs pode ser colocada em paralelo, mas a capacitância da porta aumenta a medida que mais MOSFETs são adicionados e, eventualmente, o controlador do MOSFET (se existir um) não conseguirá controlá-los. Vale a pena ressaltar que não se pode unir transistores bipolares desta maneira.

Sempre que dispositivos são operados em paralelo, a devida consideração deve ser dada à partilha entre os dispositivos, para assegurar-se de que as unidades individuais estejam sendo operadas dentro de seus limites. Os itens que devem ser considerados para que o paralelismo de MOSFETs seja um sucesso são: circuitos da porta, considerações no *layout*, desbalanceamento da corrente e o desbalanceamento da temperatura entre os dispositivos. O paralelismo ajuda a reduzir perdas de condução e de junção à resistência térmica do encapsulamento. Entretanto, a troca de

perdas continua a mesma, ou pode até mesmo aumentar. Se forem as perdas dominantes, somente uma melhora na resistência térmica será conseguida com o paralelismo. “Paralelizar” para obter vantagem de preços mais baixos sobre dispositivos menores não deve ser tentado sem a consideração devida dos riscos técnicos. Os resultados experimentais devem ser obtidos nos extremos das tolerâncias da fabricação.

É importante ressaltar a importância do balanceamento na montagem de FETs em paralelo. Como a resistência interna destes componentes é muito baixa, qualquer assimetria, por exemplo, com relação ao tamanho dos fios que os unem, pode resultar num maior fluxo de corrente para um componente do que para os outros, proporcionando o desbalanceamento da corrente e fazendo com que este componente venha a falhar. Por isso, a montagem deve ser feita com muito cuidado e com muita atenção a estas questões, para garantir que a corrente flua igualmente por todos os componentes, dividindo assim a corrente total pelo número de componentes em paralelo, aumentando a capacidade do circuito e reduzindo a produção de calor.

A parte de potência foi totalmente montada sobre uma placa de fenolite (material das placas de circuito impresso), mantendo o circuito isolado do corpo do robô, evitando curtos acidentais durante a montagem.



Fig. 60 – Placa de fenolite usada para a montagem do circuito de potência

Os FETs foram montados em paralelo em um dissipador maior do que o utilizado na versão três, para garantir a dissipação do calor produzido por estes e devido à própria necessidade de espaço para a montagem. Cuidados como o uso do mesmo tamanho em todos os fios do mesmo sinal foram tomados para garantir a simetria do circuito.



Fig. 61 – FETs em paralelo

Usou-se uma barra sindal com cinco posições para fazer a junção dos fios que saem dos FETs com os que vão para o motor, para a bateria e para o circuito de baixa potência.

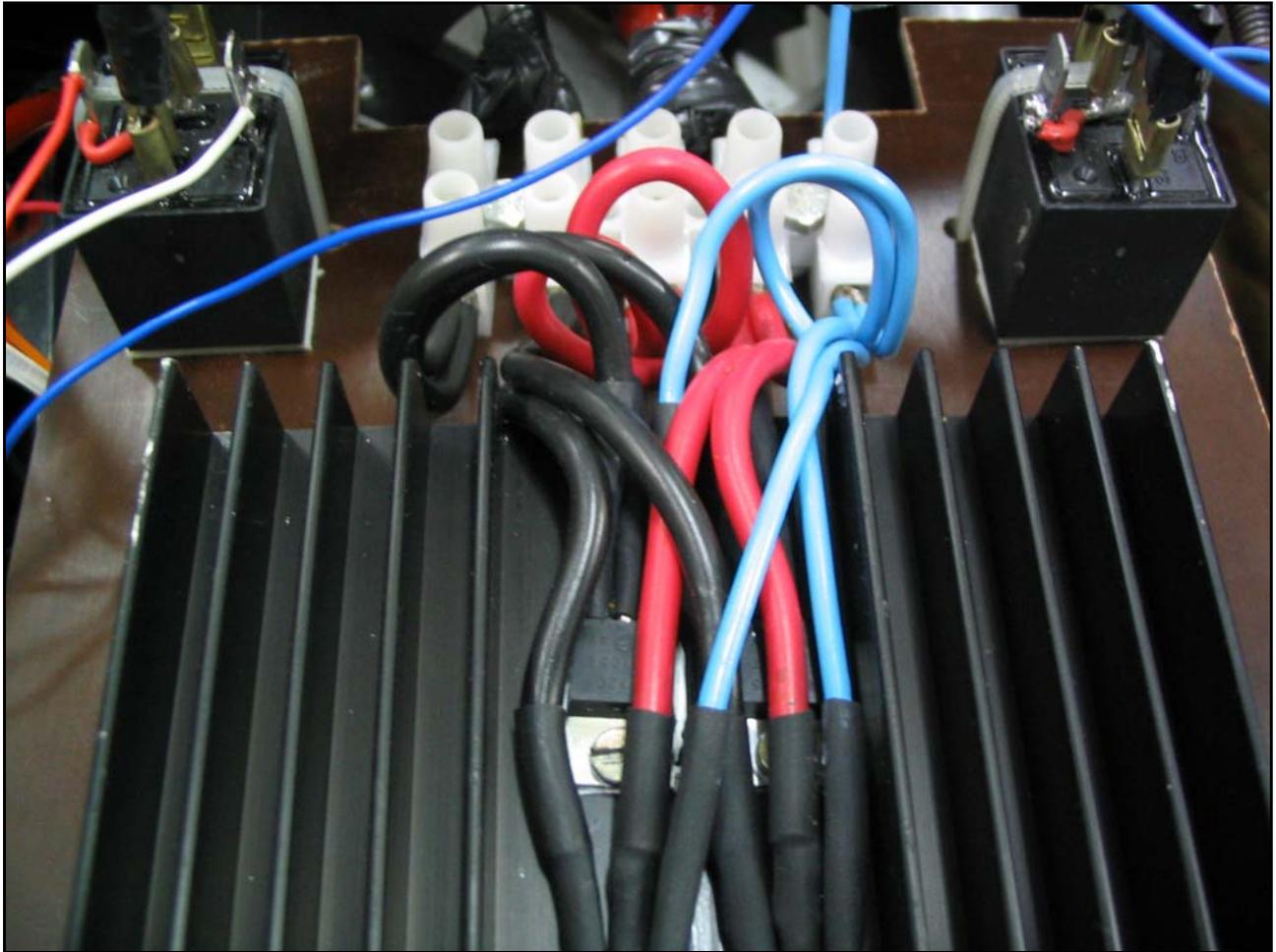


Fig. 62 – Detalhe da barra sindal unindo os fios e os relés

A placa da eletrônica de sinal (versão 3) foi fixada provisoriamente sob a placa de fenolite, para fins de teste.

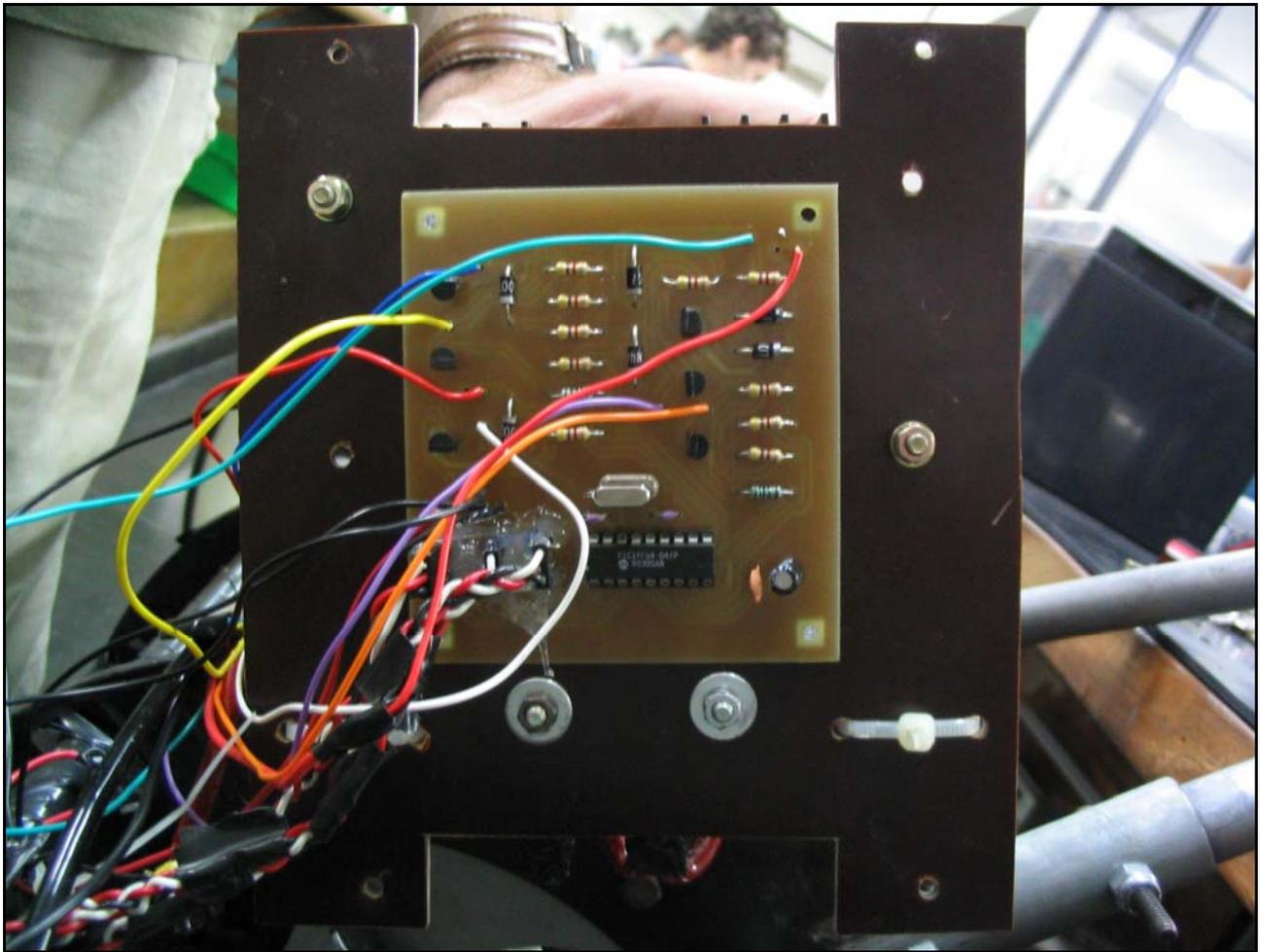


Fig. 63 – Placa de sinais fixada sob a placa de fenolite

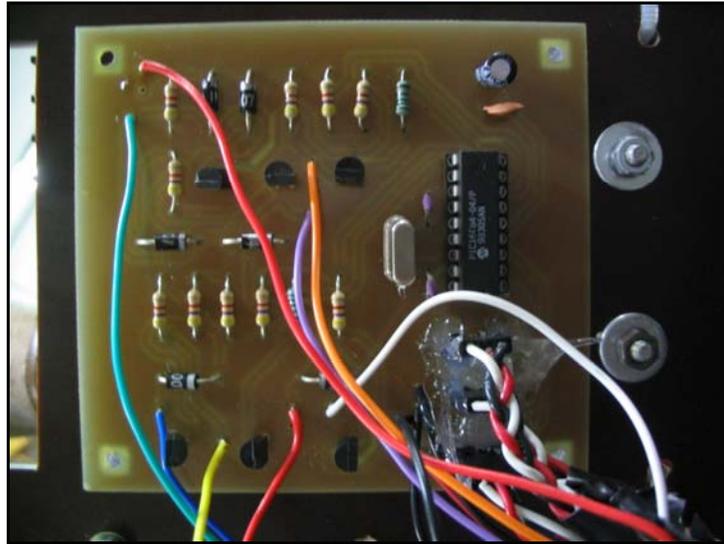


Fig. 64 – Placa de baixa potência (sinais)

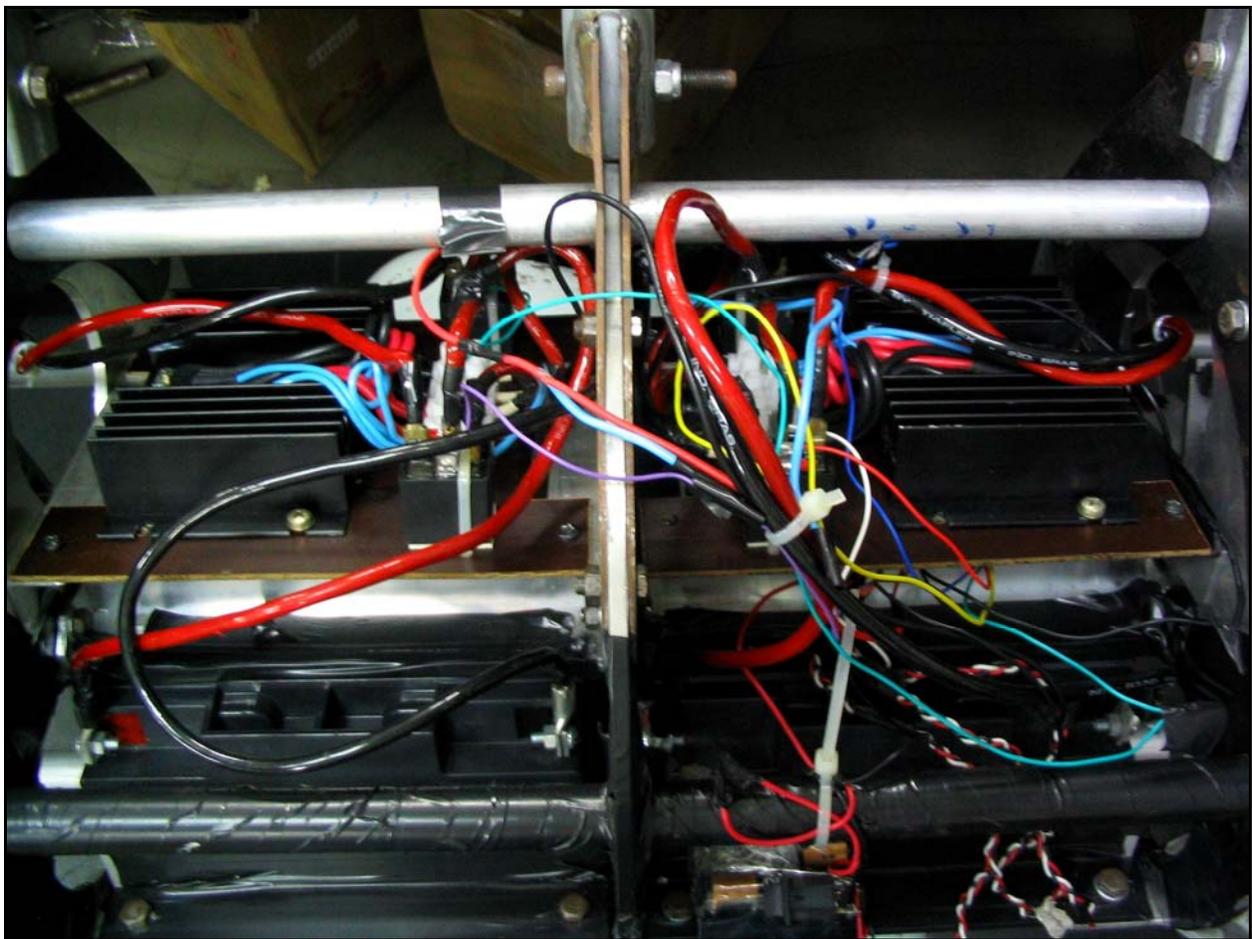


Fig. 65 – Projeto final completo

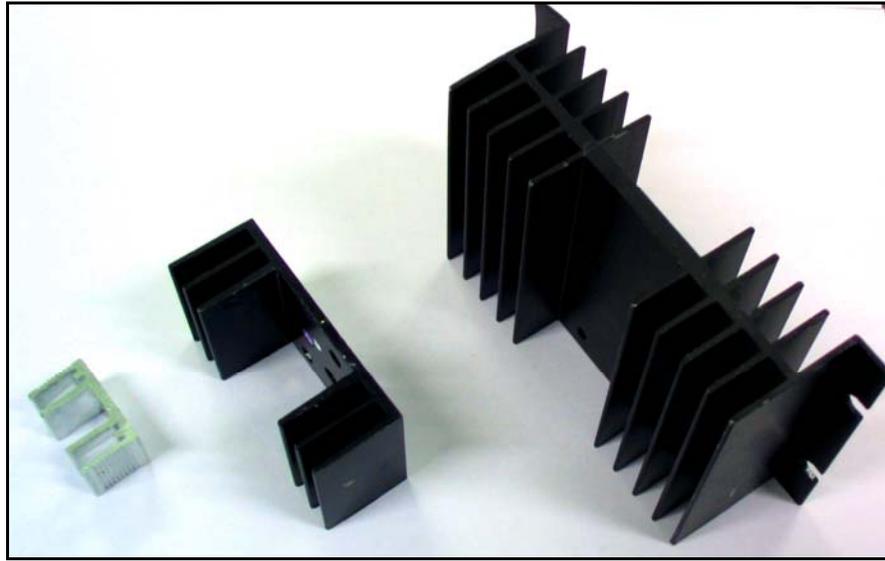


Fig. 66 – Dissipadores usados ao longo do projeto, cronologicamente da esquerda para a direita

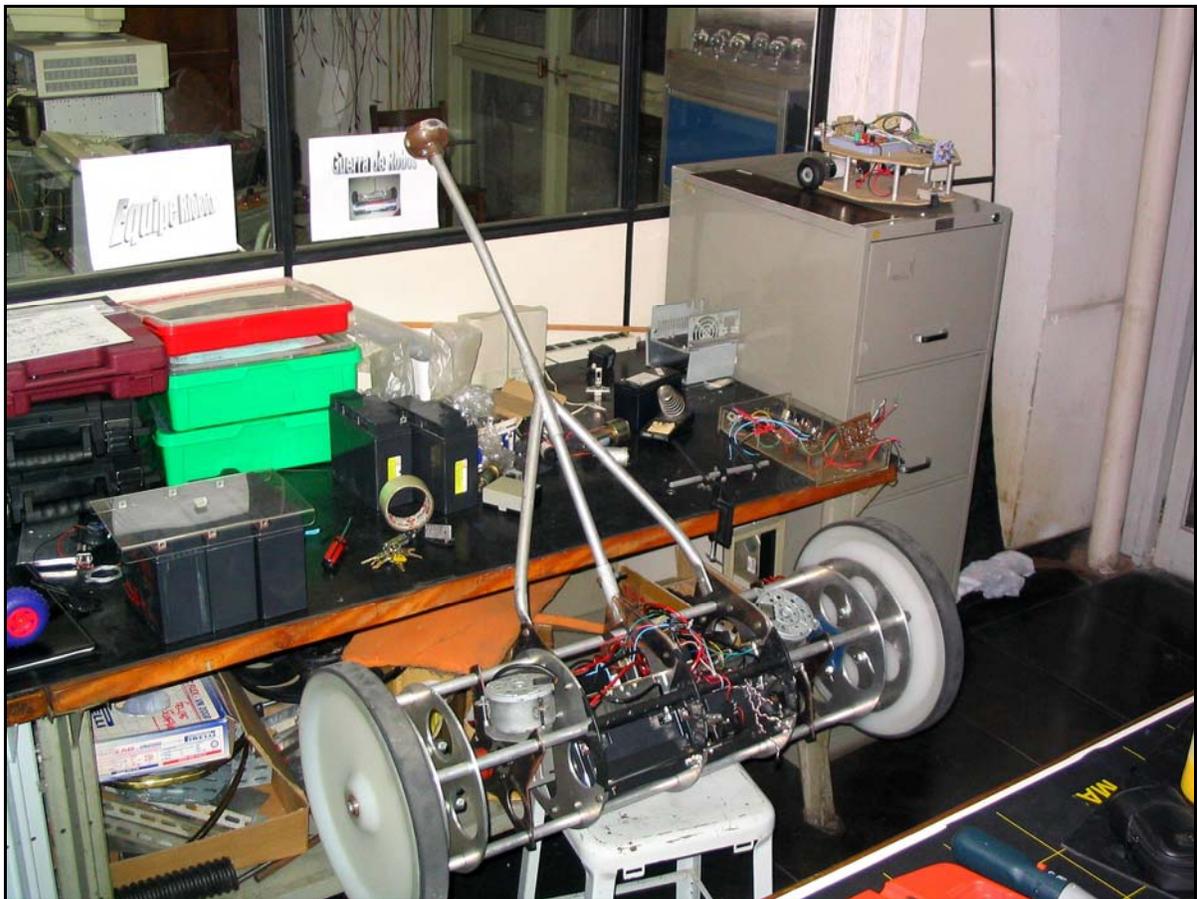


Fig. 67 – “LACRAIA” pronto para o combate

Depois da implementação do novo projeto da eletrônica de potência, o robô foi submetido a uma série de testes, com duração limitada pela capacidade das baterias. Os testes foram um sucesso. O paralelismo dos FETs e a nova configuração do circuito de potência resolveram o problema com a alta corrente e foi possível testar por completo 10 conjuntos de baterias sem que o circuito apresentasse algum tipo de problema.

As maiores correntes presentes no circuito foram medidas, resultando em 75A. Nesta situação, a corrente sobre cada FET foi 18,8A, comprovando a eficácia do sistema em paralelo construído. Abaixo é apresentada uma tabela com as correntes medidas no circuito de potência do robô.

Tabela 5 – Correntes medidas no circuito de potência

	Corrente no Motor (A)	Corrente em um FET (A)
Roda livre (sem carga)	9,2	2,3
Roda presa (stall)	75	18,8
Roda com carga	21,6	5,4

6. Conclusões

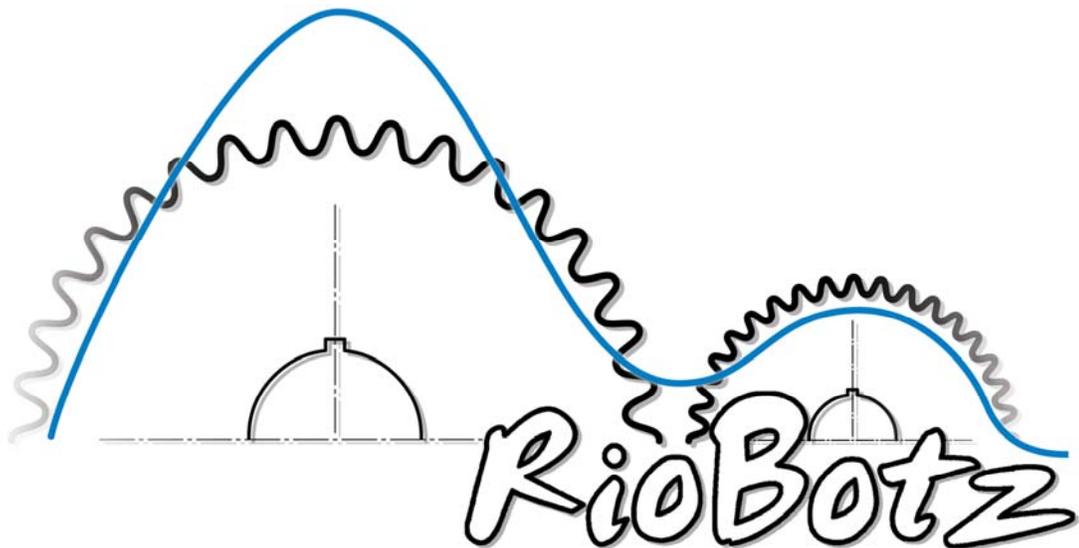
O sistema eletrônico desenvolvido controlou com sucesso os motores do robô, operando confiavelmente mesmo sob correntes de até 75A. É importante ressaltar alguns aspectos muito importantes em projetos em geral:

- Para o sucesso de um projeto é fundamental a realização de testes. Os testes devem ser feitos com antecedência de modo a corrigir os problemas inesperados e, para isso, é necessário organização, trabalho em equipe e a definição e o cumprimento de prazos e metas;
- Cuidados na hora da montagem dos componentes, utilizando as ferramentas adequadas, controlando ao máximo a ansiedade de “botar logo pra funcionar”;
- A pesquisa é fundamental para que novas idéias surjam, e para que se adquira conhecimento sobre o assunto a ser trabalhado;
- A troca de conhecimento com outras pessoas, a discussão dos problemas obtidos levando-se em conta outros pontos de vista, de pessoas mais experientes ou não. A partir de uma visão de fora às vezes pode surgir uma solução para o problema.
- Os protótipos são essenciais para se chegar às versões finais. Independente da limitação de recursos, estes não podem deixar de ser feitos.



Guerra de Robôs 2003 - Equipe RioBotz

Julio Guedes, Felipe Belo, Marco A. Meggiolaro, Luiz Guilherme Beltrão, Cláudio Duvivier, Felipe Scofano, Pedro Blois, Felipe Maimon, Rubens Arbex



7. Bibliografia

1. **CircuitMaker 2000** – The virtual electronics lab (www.microcode.com).
2. **Computer Radio 6X Super FUTABA Instruction Manual**, FUTABA Corporation.
3. Dorf, R.C., Svoboda, J. A., **Introduction to Electric Circuits**, John Wiley & Sons, 2001.
4. **EAGLE Layout Editor** – (www.cadsoftusa.com).
5. Hannold, C., **Combat Robots Complete**, McGraw-Hill, 2003.
6. Horovitz, P., Hill, W., **The Art of Eletronics**, Cambridge University Press, 1989.
7. Lunt, K., **Build Your Own Robot**, A K Peters, 2000.
8. Miles, P., Carroll,T., **Build Your Own Combat Robot**, McGraw-Hill, 2002.
9. Pereira, F., **Microcontroladores PIC**, 2^a edição, Érica, 2000.
10. Planchard, D., Planchard, D., Planchard, M., **SolidWorks 2003 Tutorial**, Paperback, 2003.
11. Sedra & Smith, **Microeletrônica**, MAKRON Books, 2000.

Links:

<http://www.microcode.com/>

<http://www.irf.com>

<http://www.metaltex.com.br/>

<http://br.geocities.com/saladefisica>

<http://www.torreypinesgulls.org/>

<http://www.eatel.net/~amptech/elecdisc/tranfet.htm>

<http://www-cdr.stanford.edu/dynamic/servo/>

<http://www.4qdtc.com/>

<http://www.patchn.com>

<http://homepages.which.net/~paul.hills/Circuits/>

<http://www.fatlion.com/sailplanes/radios.html>

APÊNDICE 1 - Datasheets, especificações, gráficos e outros

APÊNDICE 2 – Desenhos dos Layouts e Esquemáticos das placas

Tabela dos tamanhos dos fios (padrão americano – AWG) relacionado com Diâmetro/Resistência/Capacidade de Corrente

AWG gauge	Diameter Inches	Diameter mm	Resistance Ohms per 1000 ft	Resistance Ohms per km	Current Capacity Approximate Amperage
0000	0.46	11.684	0.049	0.16072	445
000	0.4096	10.40384	0.0618	0.202704	385
00	0.3648	9.26592	0.0779	0.255512	330
0	0.3249	8.25246	0.0983	0.322424	285
2	0.2576	6.54304	0.1563	0.512664	210
4	0.2043	5.18922	0.2485	0.81508	160
6	0.162	4.1148	0.3951	1.295928	120
8	0.1285	3.2639	0.6282	2.060496	80
10	0.1019	2.58826	0.9989	3.276392	60
12	0.0808	2.05232	1.588	5.20864	45
14	0.0641	1.62814	2.525	8.282	35
16	0.0508	1.29032	4.016	13.17248	25
18	0.0403	1.02362	6.385	20.9428	28

Motor Tipo GPB



Características Técnicas

Tensão dos Motores: 12 VCC ou 24 VCC

Potência Máxima: 380 W

Velocidade: 1

Consumo Nominal: 18 A (Conforme torque)

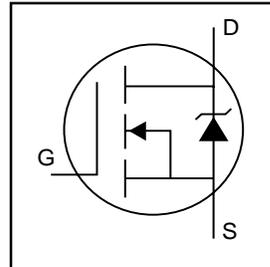
Rotações: 3000 rpm

Sentido de Giro: L/R

IRF3205

HEXFET® Power MOSFET

- Advanced Process Technology
- Ultra Low On-Resistance
- Dynamic dv/dt Rating
- 175°C Operating Temperature
- Fast Switching
- Fully Avalanche Rated

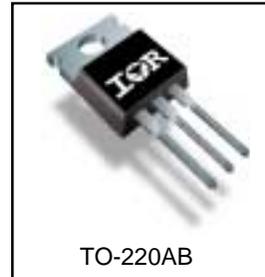


$V_{DSS} = 55V$
$R_{DS(on)} = 8.0m\Omega$
$I_D = 110A^{\textcircled{5}}$

Description

Advanced HEXFET® Power MOSFETs from International Rectifier utilize advanced processing techniques to achieve extremely low on-resistance per silicon area. This benefit, combined with the fast switching speed and ruggedized device design that HEXFET power MOSFETs are well known for, provides the designer with an extremely efficient and reliable device for use in a wide variety of applications.

The TO-220 package is universally preferred for all commercial-industrial applications at power dissipation levels to approximately 50 watts. The low thermal resistance and low package cost of the TO-220 contribute to its wide acceptance throughout the industry.



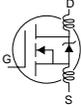
Absolute Maximum Ratings

	Parameter	Max.	Units
$I_D @ T_C = 25^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	110 ^⑤	A
$I_D @ T_C = 100^\circ C$	Continuous Drain Current, $V_{GS} @ 10V$	80	
I_{DM}	Pulsed Drain Current ^①	390	
$P_D @ T_C = 25^\circ C$	Power Dissipation	200	W
	Linear Derating Factor	1.3	W/°C
V_{GS}	Gate-to-Source Voltage	± 20	V
I_{AR}	Avalanche Current ^①	62	A
E_{AR}	Repetitive Avalanche Energy ^①	20	mJ
dv/dt	Peak Diode Recovery dv/dt ^③	5.0	V/ns
T_J	Operating Junction and Storage Temperature Range	-55 to + 175	°C
T_{STG}			
	Mounting torque, 6-32 or M3 screw	10 lbf•in (1.1N•m)	

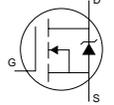
Thermal Resistance

	Parameter	Typ.	Max.	Units
$R_{\theta JC}$	Junction-to-Case	—	0.75	°C/W
$R_{\theta CS}$	Case-to-Sink, Flat, Greased Surface	0.50	—	
$R_{\theta JA}$	Junction-to-Ambient	—	62	

Electrical Characteristics @ T_J = 25°C (unless otherwise specified)

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
V _{(BR)DSS}	Drain-to-Source Breakdown Voltage	55	—	—	V	V _{GS} = 0V, I _D = 250μA
ΔV _{(BR)DSS/ΔT_J}	Breakdown Voltage Temp. Coefficient	—	0.057	—	V/°C	Reference to 25°C, I _D = 1mA
R _{DS(on)}	Static Drain-to-Source On-Resistance	—	—	8.0	mΩ	V _{GS} = 10V, I _D = 62A ④
V _{GS(th)}	Gate Threshold Voltage	2.0	—	4.0	V	V _{DS} = V _{GS} , I _D = 250μA
g _{fs}	Forward Transconductance	44	—	—	S	V _{DS} = 25V, I _D = 62A④
I _{DSS}	Drain-to-Source Leakage Current	—	—	25	μA	V _{DS} = 55V, V _{GS} = 0V
		—	—	250		V _{DS} = 44V, V _{GS} = 0V, T _J = 150°C
I _{GSS}	Gate-to-Source Forward Leakage	—	—	100	nA	V _{GS} = 20V
	Gate-to-Source Reverse Leakage	—	—	-100		V _{GS} = -20V
Q _g	Total Gate Charge	—	—	146	nC	I _D = 62A
Q _{gs}	Gate-to-Source Charge	—	—	35		V _{DS} = 44V
Q _{gd}	Gate-to-Drain ("Miller") Charge	—	—	54		V _{GS} = 10V, See Fig. 6 and 13
t _{d(on)}	Turn-On Delay Time	—	14	—	ns	V _{DD} = 28V
t _r	Rise Time	—	101	—		I _D = 62A
t _{d(off)}	Turn-Off Delay Time	—	50	—		R _G = 4.5Ω
t _f	Fall Time	—	65	—		V _{GS} = 10V, See Fig. 10 ④
L _D	Internal Drain Inductance	—	4.5	—	nH	Between lead, 6mm (0.25in.) from package and center of die contact
L _S	Internal Source Inductance	—	7.5	—		
C _{iss}	Input Capacitance	—	3247	—	pF	V _{GS} = 0V
C _{oss}	Output Capacitance	—	781	—		V _{DS} = 25V
C _{rss}	Reverse Transfer Capacitance	—	211	—		f = 1.0MHz, See Fig. 5
E _{AS}	Single Pulse Avalanche Energy②	—	1050⑥	264⑦		mJ

Source-Drain Ratings and Characteristics

	Parameter	Min.	Typ.	Max.	Units	Conditions
I _S	Continuous Source Current (Body Diode)	—	—	110	A	MOSFET symbol showing the integral reverse p-n junction diode. 
I _{SM}	Pulsed Source Current (Body Diode)①	—	—	390		
V _{SD}	Diode Forward Voltage	—	—	1.3	V	T _J = 25°C, I _S = 62A, V _{GS} = 0V ④
t _{rr}	Reverse Recovery Time	—	69	104	ns	T _J = 25°C, I _F = 62A
Q _{rr}	Reverse Recovery Charge	—	143	215	nC	di/dt = 100A/μs ④
t _{on}	Forward Turn-On Time	Intrinsic turn-on time is negligible (turn-on is dominated by L _S +L _D)				

Notes:

- ① Repetitive rating; pulse width limited by max. junction temperature. (See fig. 11)
- ② Starting T_J = 25°C, L = 138μH
R_G = 25Ω, I_{AS} = 62A. (See Figure 12)
- ③ I_{SD} ≤ 62A, di/dt ≤ 207A/μs, V_{DD} ≤ V_{(BR)DSS},
T_J ≤ 175°C
- ④ Pulse width ≤ 400μs; duty cycle ≤ 2%.
- ⑤ Calculated continuous current based on maximum allowable junction temperature. Package limitation current is 75A.
- ⑥ This is a typical value at device destruction and represents operation outside rated limits.
- ⑦ This is a calculated value limited to T_J = 175°C.

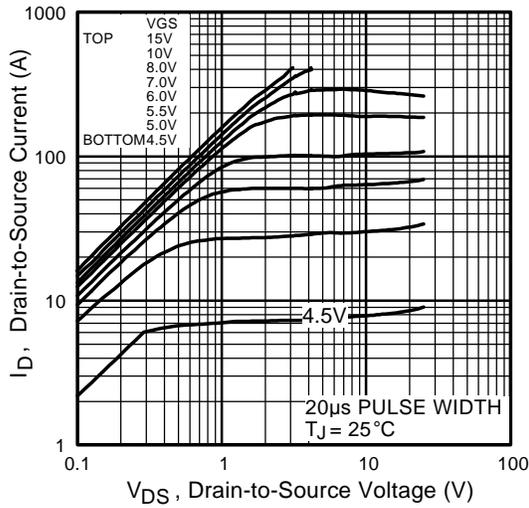


Fig 1. Typical Output Characteristics

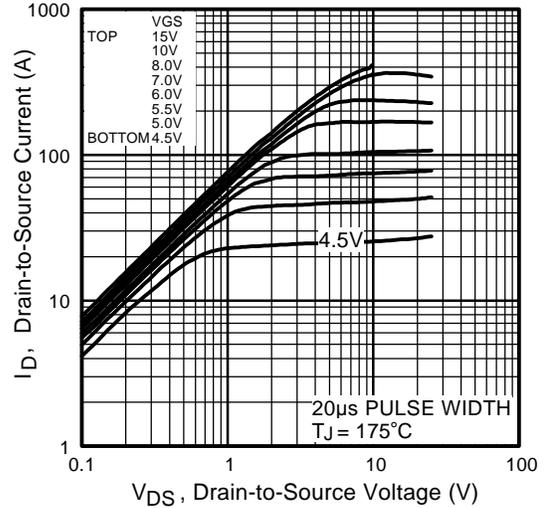


Fig 2. Typical Output Characteristics

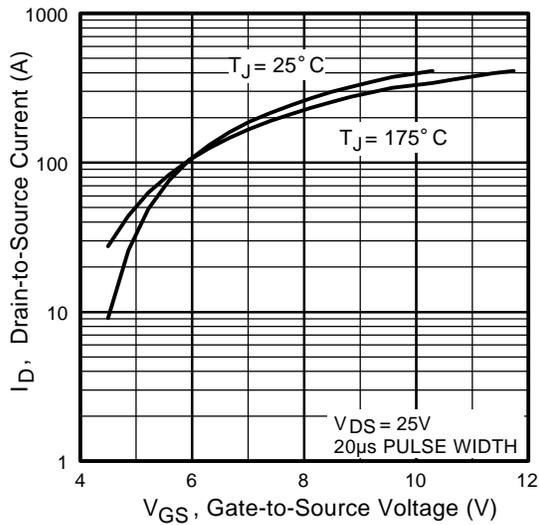


Fig 3. Typical Transfer Characteristics

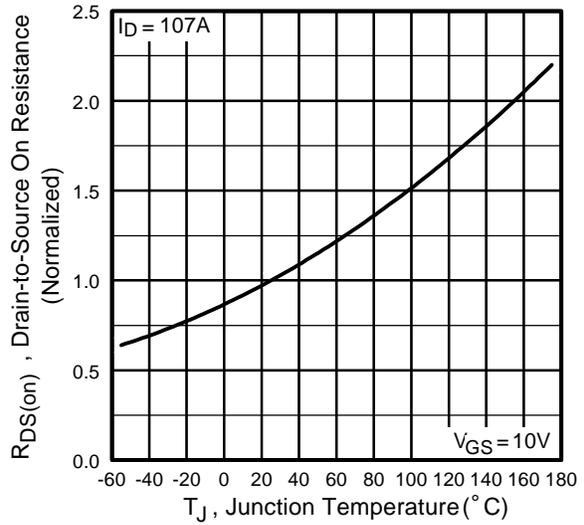


Fig 4. Normalized On-Resistance Vs. Temperature

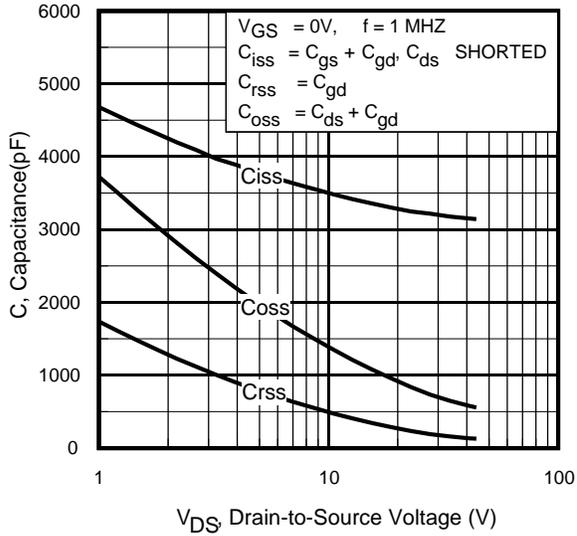


Fig 5. Typical Capacitance Vs. Drain-to-Source Voltage

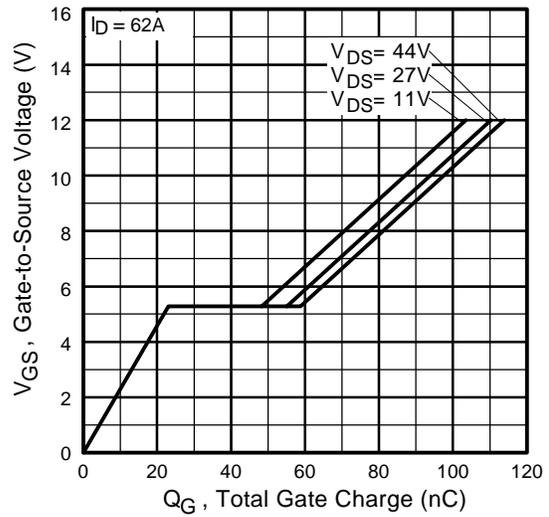


Fig 6. Typical Gate Charge Vs. Gate-to-Source Voltage

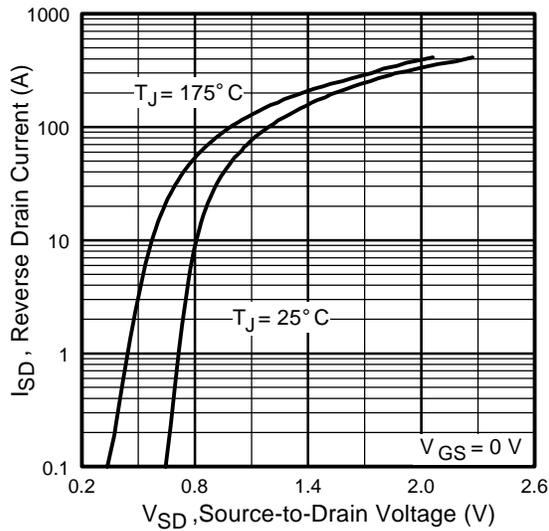


Fig 7. Typical Source-Drain Diode Forward Voltage

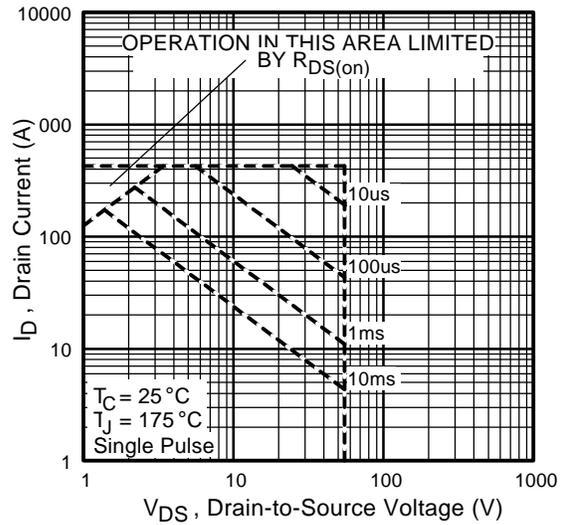


Fig 8. Maximum Safe Operating Area

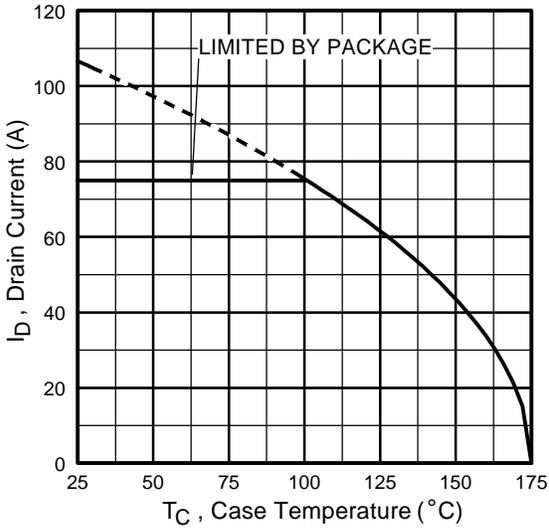


Fig 9. Maximum Drain Current Vs. Case Temperature

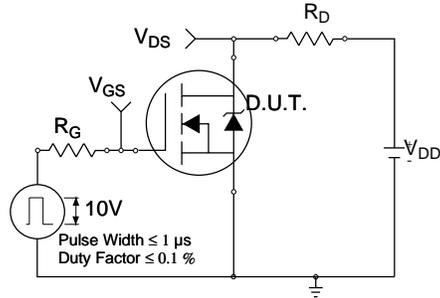


Fig 10a. Switching Time Test Circuit

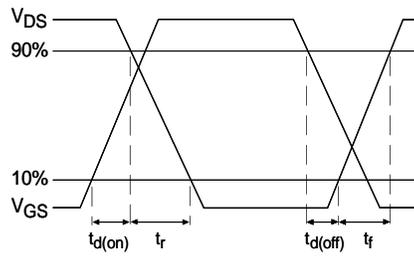


Fig 10b. Switching Time Waveforms

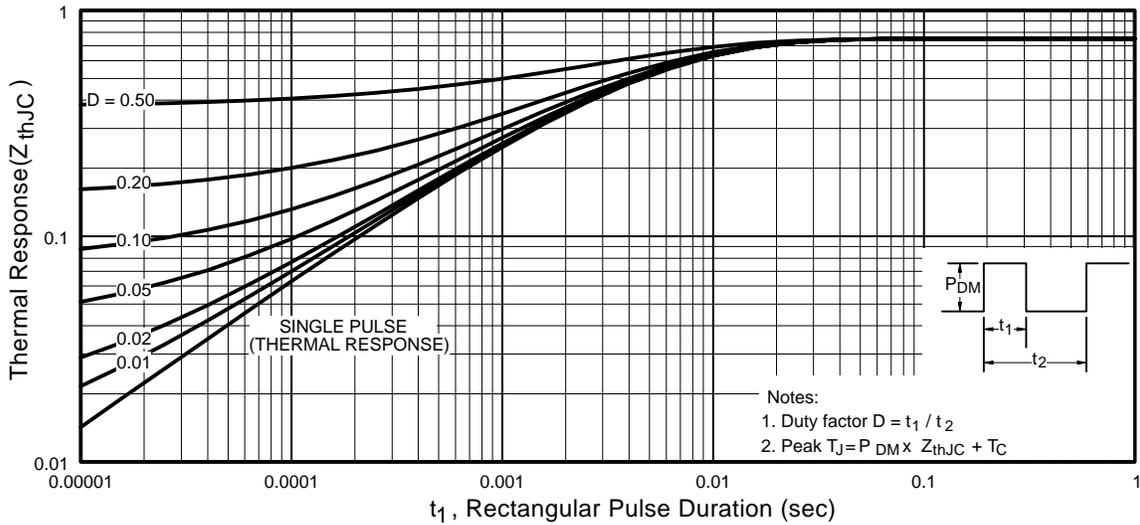


Fig 11. Maximum Effective Transient Thermal Impedance, Junction-to-Case

IRF3205

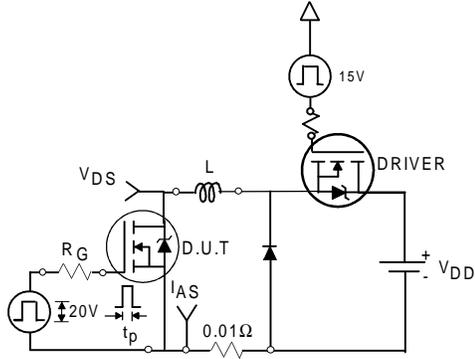


Fig 12a. Unclamped Inductive Test Circuit

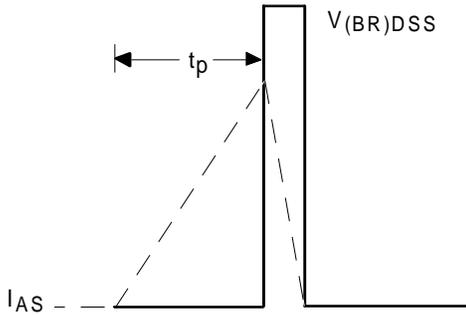


Fig 12b. Unclamped Inductive Waveforms

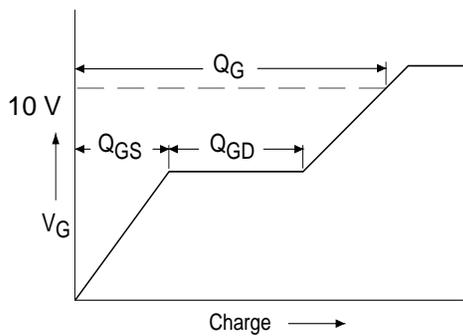


Fig 13a. Basic Gate Charge Waveform

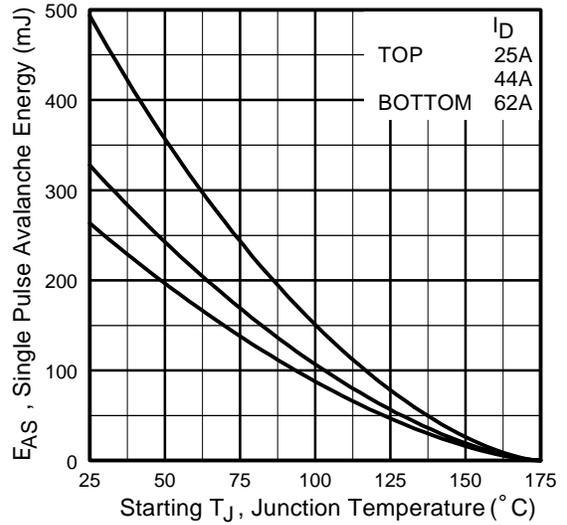


Fig 12c. Maximum Avalanche Energy Vs. Drain Current

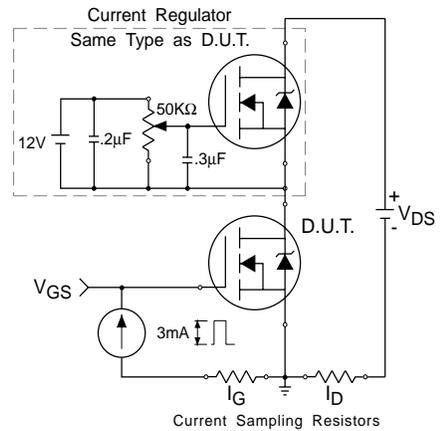
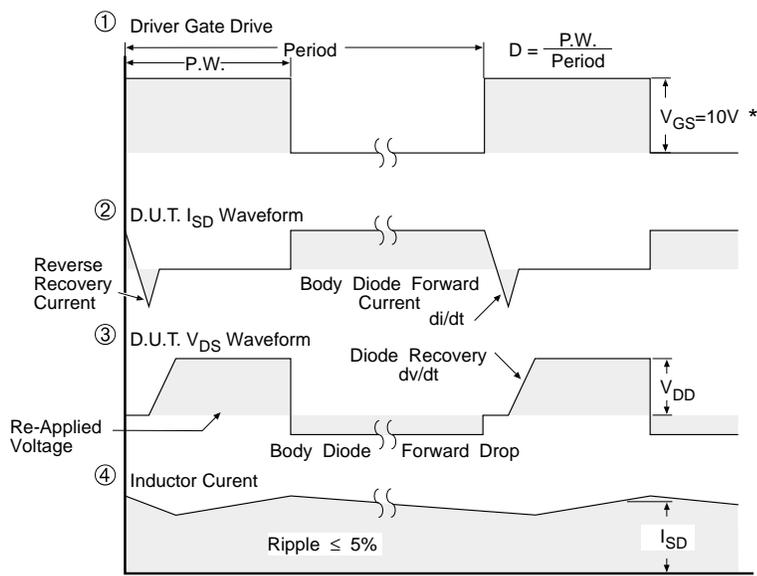
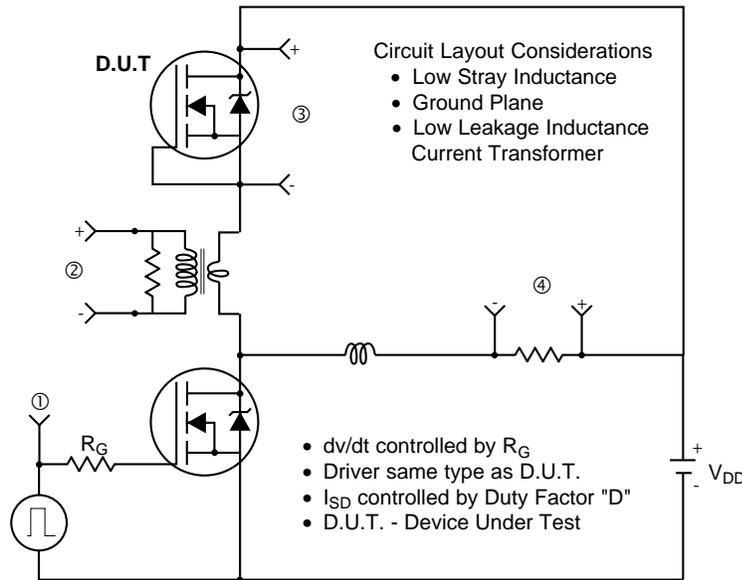


Fig 13b. Gate Charge Test Circuit

Peak Diode Recovery dv/dt Test Circuit



* $V_{GS} = 5V$ for Logic Level Devices

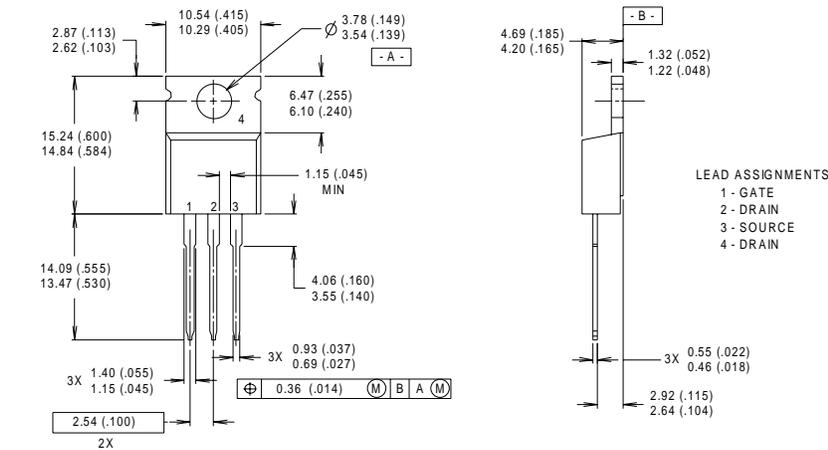
Fig 14. For N-Channel HEXFETS

IRF3205

Package Outline

TO-220AB Outline

Dimensions are shown in millimeters (inches)

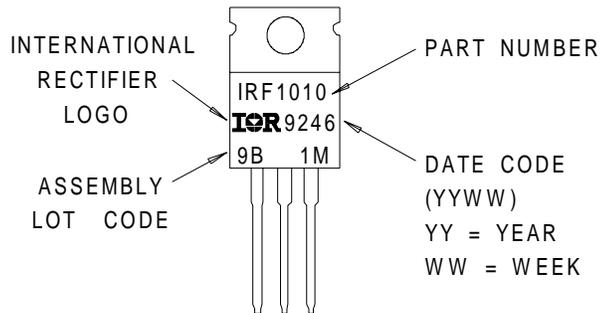


- NOTES:
- 1 DIMENSIONING & TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 - 2 CONTROLLING DIMENSION : INCH
 - 3 OUTLINE CONFORMS TO JEDEC OUTLINE TO-220AB.
 - 4 HEATSINK & LEAD MEASUREMENTS DO NOT INCLUDE BURRS.

Part Marking Information

TO-220AB

EXAMPLE : THIS IS AN IRF1010
WITH ASSEMBLY
LOT CODE 9B1M

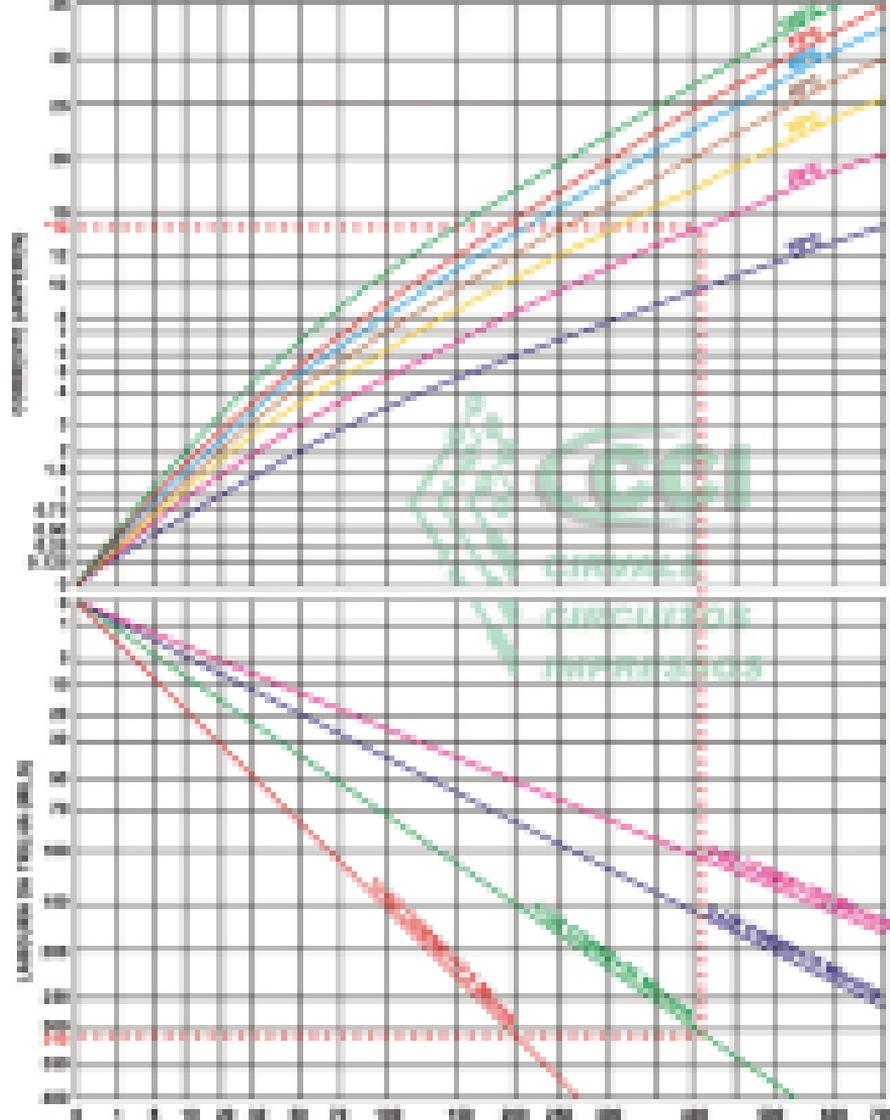


Data and specifications subject to change without notice.
This product has been designed and qualified for the automotive [Q101] market.
Qualification Standards can be found on IR's Web site.

International
IOR Rectifier

IR WORLD HEADQUARTERS: 233 Kansas St., El Segundo, California 90245, USA Tel: (310) 252-7105
TAC Fax: (310) 252-7903

Visit us at www.irf.com for sales contact information.01/01

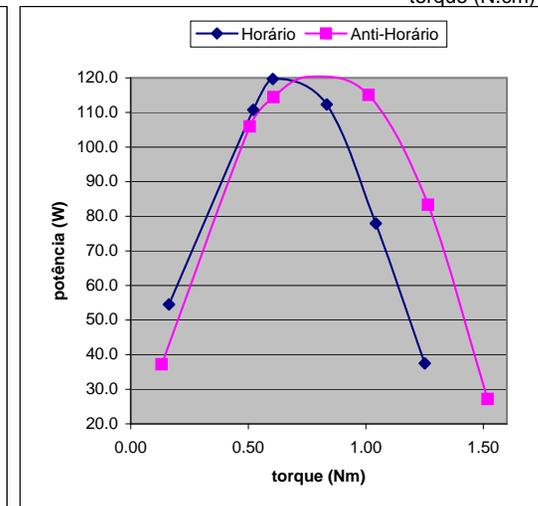
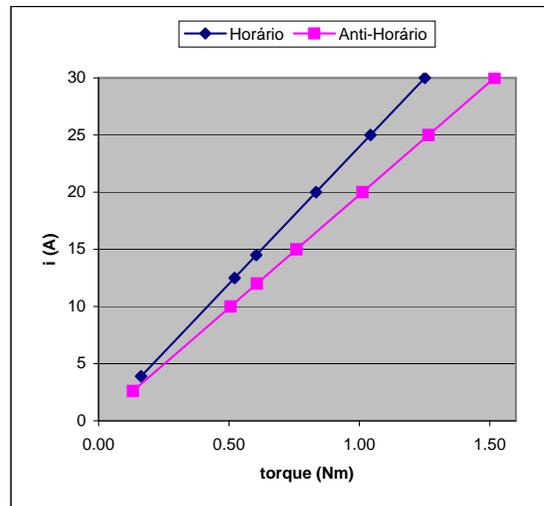
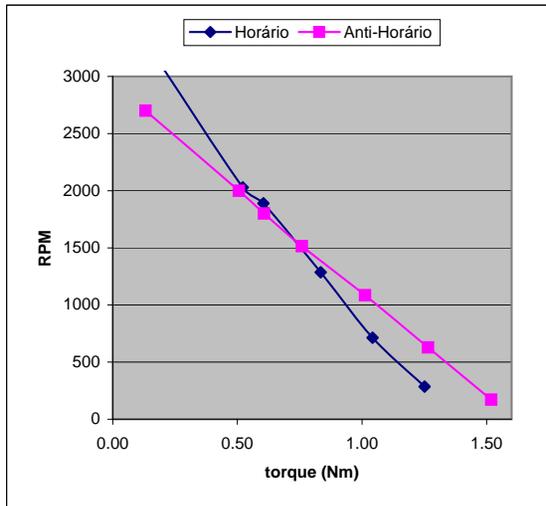
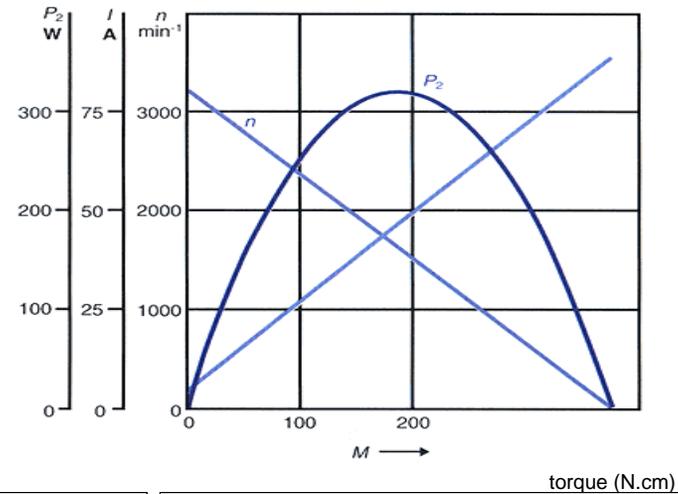


PLANILHA DE FORNECEDORES

Nome	Endereço	Telefone	Observação	WWW	e-mail
São Paulo					
Telefone (0xx11)					
Casa AeroBrás	Rua Major Sertório, 192	3255-0544	só boa para aeromodelismo	www.casaerobras.com.br	
Cideral Rolamentos	Rua Florêncio de Abreu, 344 e 359	228-2055, 229-5658	rolamentos		cideral@cideral.com.br
Correias Schneider	Rua Florêncio de Abreu, 647	3315-0777, 3326-3955	polias de Al e ferro e correias, muito cara	www.correias.com.br	vendas@correias.com.br
Cristal-Max Eletrônica	Rua Vitória, 85	3331-0496, 3333-5070, 33301378	sucataão		
CRS Comp. Eletrônicos	Rua Timbiras, 270	222-8644, 33381554, 33381533	tem alguns PIC's e dissipadores	www.crscomponentes.com.br	crs@crscomponentes.com.br
Dina	Rua Florêncio de Abreu, 607	3326-6066	polias de aço e correias, bom preço	www.dina.com.br	borrachas@dina.com.br
Jelmark	Rua Florêncio de Abreu, 252	229-8022	a melhor para rodas, tem rolamentos	www.Jelmark.com.br	jelmark@jelmark.com.br
Mult Comercial	Rua Timbiras, 238	3325-0772	melhor loja para PIC		
Optek Eletrônica	Rua Timbiras, 256	3337-8000	sucataão, ótima para motores	www.optek.com.br	
Saco de Ouro Comercial	Rua Vitória, 357	3337-8300, 3337-8933			
Speed Modelismo	Rua Bento Freitas, 162-A	221-3550	aero e auto modelismo, mas muito cara	www.speedmodelismo.com.br	
Trancham S/A	Rua Santa Ifigênia, 519, 556 e 280	3335-4900	dissipador 119K a R\$8,00	www.trancham.com.br	519@trancham.com.br
Rio de Janeiro					
Telefone (0xx21)					
MECÂNICA					
Casa das Correntes Guanabara	Rua Figueira de Melo, 324 - São Cristóvão	2589-4413	correntes, engrenagens dentadas	www.correntesguanabara.com.br	vendas@correntesguanabara.com.br
Mecânica Alves	Rua Figueira de Melo, 255 A - São Cristóvão	2589-1581	torneiro mecânico (Joel)		
Condor	Rua Figueira de Melo, 337 - São Cristóvão	3908-0297	borrachas em geral, polias e acoplamentos		
AGM Rolamentos	Rua Figueira de Melo, 363 A - São Cristóvão	2589-6402	rolamentos, mancais	www.agmrolamentos.com.br	agmrol@bol.com.br
Realeza Rolamentos	Rua Figueira de Melo, 410 C - São Cristóvão	3860-6146/3860-6147	mancais, acoplamentos		
Guilherme Balda	Rua Figueira de Melo, 426 A - São Cristóvão	2589/6088	rolamentos, mancais		
Center Bor Borrachas	Rua Figueira de Melo, 348 - São Cristóvão	2580-4208/2580-4219	borrachas, correias, cordas nylon, rodas		centerbor@ig.com.br
MAC-ROL	Rua São Cristóvão, 417 B - São Cristóvão	2589-9316	rolamentos, mancais		
Soberana 503	Rua São Cristóvão, 503 - São Cristóvão	2585-3244	tudo de parafusos, a melhor que tem lá		soberana@domain.com.br
Parafusos AGAGÊ	Rua Figueira de Melo, 367 - São Cristóvão	2589-7978	parafusos, boa também		
União Borrachas Comércio	Rua Frolick, 43 - Loja A - São Cristóvão	2589-2860/2589-9675	borrachas, poliuretano, buchas, etc	www.uniaoborracha.com.br	uniaio.rlk@terra.com.br
Almeida Comércio e Indústria de Ferro	Rua General Bruce, 102 E 126 - S. Cristóvão	2580-1868	chapas, eixos de ferro, tubos, ferros		
ELETRÔNICA					
Rei das Válvulas	Rua da Constituição, 59 - Centro	2509-7019	melhor de componentes eletrônicos		reidasvalvulas@ig.com.br
Enfimac Eletrônica	Rua República do Líbano, 25 B - Centro	2242-2412/2224-7842	componentes eletrônicos		
Alfamec Eletrônica	Rua República do Líbano, 37 A - Centro	2252-9058	eletrônica		
Eletrônica Simão	Rua República do Líbano, 51 - Centro	2221-2783	segundo melhor de eletrônica		

Resultados dos testes realizados com o motor GPB (BOSCH)

	i (A)	RPM	Potência Elétrica (W)	torque estimado (Nm)	Potência Mecânica (W)	Eficiência Mecânica
Horário NoLoad	3.9	3200	46.8	0.16	54.5	
Horário invertido	12.5	2029	150	0.52	110.8	74%
Horário	14.5	1890	174	0.60	119.7	69%
Horário	20	1286	240	0.83	112.3	47%
Horário	25	714	300	1.04	77.9	26%
Horário	30	286	360	1.25	37.5	10%
Horário	33	0	396	1.38	0.0	0%
Anti-Hor. NoLoad	2.6	2700	31.2	0.13	37.2	
Anti-horário	10	2000	120	0.51	106.0	88%
Anti-Hor. Inv.	12	1800	144	0.61	114.5	79%
Anti-horário	15	1514	180	0.76	120.3	67%
Anti-horário	20	1086	240	1.01	115.1	48%
Anti-horário	25	629	300	1.27	83.3	28%
Anti-horário	30	171	360	1.52	27.2	8%
Anti-horário	33	0	396	1.67	0.0	0%





GP 12170

12V 17.0Ah

GP 12170 is a general purpose battery with 3-5 years in standby service or more than 260 cycles at 100% discharge in cycle service. As with all CSB batteries, all are rechargeable, highly efficient, leak proof and maintenance free.



Specification

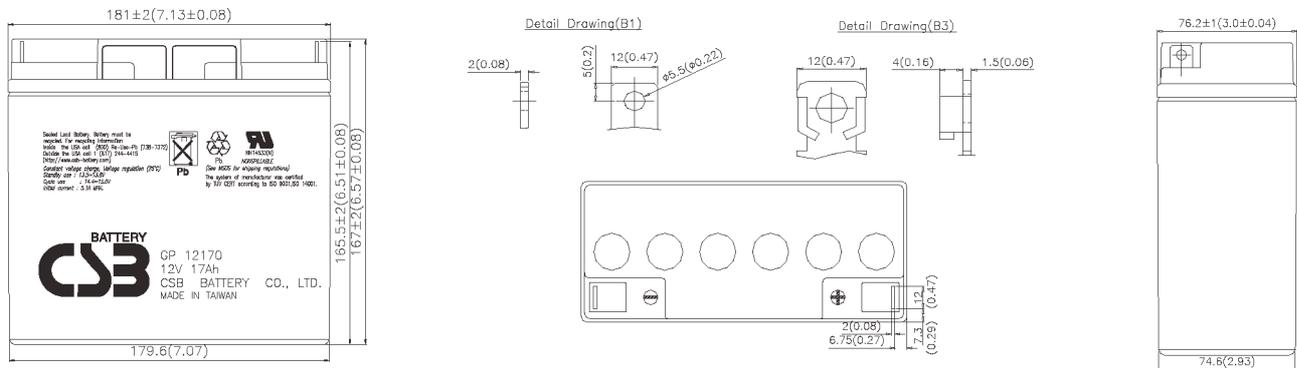
Cells Per Unit	6
Voltage Per Unit	12
Capacity	17Ah @ 20hr-rate to 1.75V per cell @25°C(77°F)
Weight	Approx. 5.85kg(12.9 lbs)
Maximum Discharge Current	230A(5sec)
Internal Resistance	Approx. 15mΩ
Operating Temperature Range	Discharge: -20°C ~50°C (-4°F~122°F) Charge: 0°C ~40°C (32°F~104°F) Storage: -20°C ~40°C (-4°F~104°F)
Nominal Operating Temperature Range	25°C±3°C (77°F±5°F)
Float Charging Voltage	13.5 to 13.8 VDC/unit Average at 25°C(77°F)
Recommended Maximum Charging Current Limit	5.1A
Equalization and Cycle Service	14.4 to 15.0 VDC/unit Average at 25°C(77°F)
Self Discharge	CSB Batteries can be stored for more than 6 months at 25°C (77°F). Please charge batteries before using. For higher temperatures the time interval will be shorter.
Terminal	Faston Tab 187/250
Container Material	-ABS (UL94-HB)*Flammability resistance of UL94-V2 can be available upon request.



CSB-manufactured batteries are UL-recognized components under UL924 and UL1989. CSB is also certified by ISO 9001 and ISO 14001.

Dimensions

unit: (MM)



Constant Current Discharge Characteristics Unit:A(25°C,77°F)

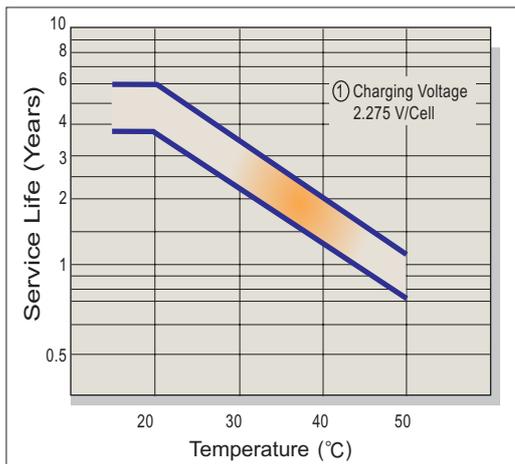
F.V/Time	5MIN	10MIN	15MIN	30MIN	1HR	2HR	3HR	4HR	5HR	8HR	10HR	20HR
1.60V	80.2	50.9	38.5	23.4	13.8	8.03	5.72	4.44	3.63	2.37	1.93	1.00
1.67V	71.2	47.5	36.8	23.1	13.8	8.03	5.71	4.43	3.62	2.36	1.90	0.958
1.70V	67.4	46.0	36.0	22.9	13.8	8.03	5.70	4.43	3.61	2.35	1.89	0.940
1.75V	61.0	43.1	34.3	22.3	13.5	7.96	5.66	4.41	3.60	2.33	1.86	0.910
1.80V	54.5	40.2	32.7	21.8	13.3	7.88	5.61	4.38	3.58	2.30	1.83	0.880
1.85V	48.0	37.3	31.0	21.2	13.1	7.81	5.57	4.36	3.57	2.28	1.80	0.850

Constant Power Discharge Characteristics Unit:Watt(25°C,77°F)

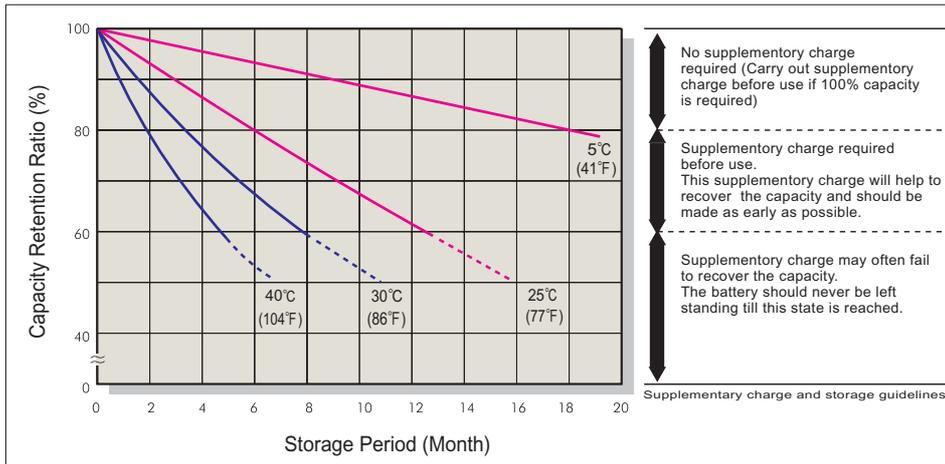
F.V/Time	5MIN	10MIN	15MIN	30MIN	1HR	2HR	3HR	4HR	5HR	8HR	10HR	20HR
1.60V	962	611	462	281	166	96.4	68.6	53.3	43.6	28.4	23.1	12.0
1.67V	855	570	441	277	165	96.3	68.5	53.2	43.4	28.3	22.8	11.5
1.70V	809	552	432	275	165	96.3	68.4	53.2	43.3	28.2	22.7	11.3
1.75V	732	517	412	268	163	95.5	67.9	52.9	43.2	27.9	22.4	10.9
1.80V	654	482	392	261	160	94.6	67.3	52.6	43.0	27.6	22.0	10.5
1.85V	577	447	372	254	158	93.8	66.8	52.3	42.9	27.3	21.7	10.1

* All mentioned values are average values

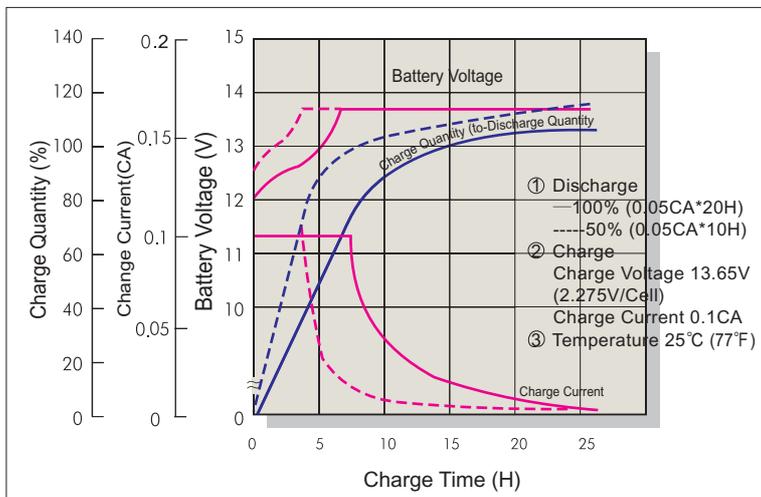
Trickle (or Float) Service Life



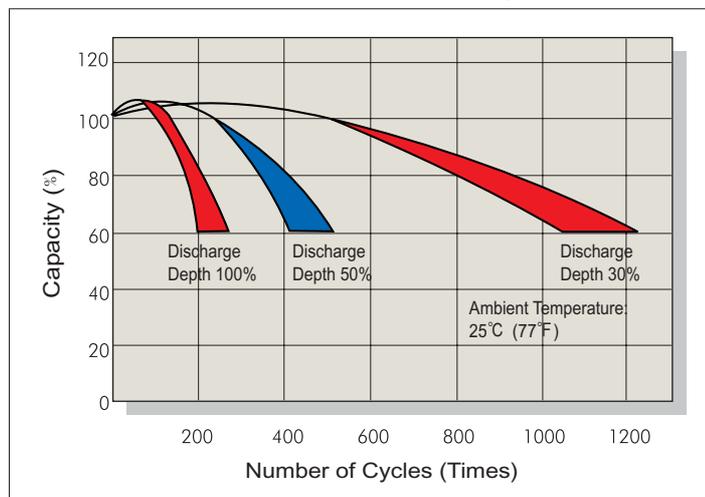
Capacity Retention Characteristic



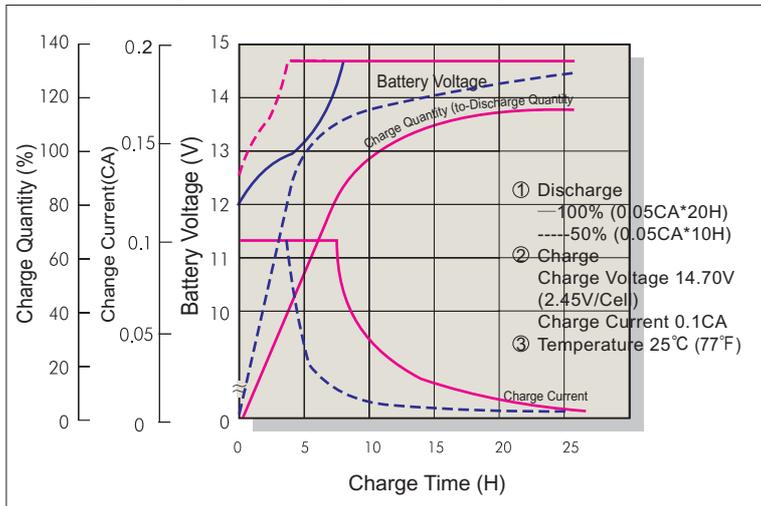
Battery Voltage and Charge Time for Standby Use



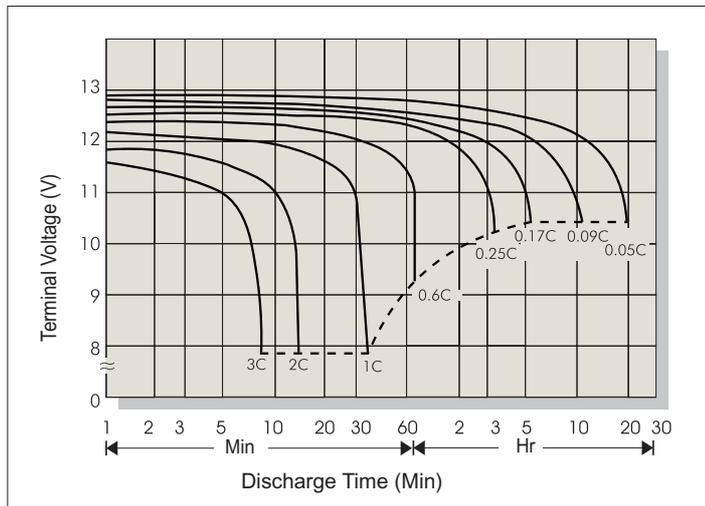
Cycle Service Life



Battery Voltage and Charge Time for Cycle Use



Terminal Voltage (V) and Discharge Time (25°C 77°F)



Charging Procedures

Application	Charge Voltage (V/Cell)			Max. Charge Current
	Temperature	Set Point	Allowable Range	
Cycle Use	25°C (77°F)	2.45	2.40~2.50	0.3CA
Standby	25°C (77°F)	2.275	2.25~2.30	

Discharge Current VS. Discharge Voltage

Discharge Current (A)	0.2C>(A)	0.2C<(A)<0.5C	0.5C<(A)<1.0C	(A)>1.0C
Final Discharge Voltage V/Cell	1.75	1.70	1.55	1.30

CSB BATTERY CO., LTD.
TAIPEI HEADQUARTERS
 10F1, No. 301, Sec. 2, Tiding Blv.,
 Nei-Hu, Taipei (114), Taiwan, R.O.C.
 Tel : 886-2-87515000
 Fax: 886-2-87516161
 E-mail: service@csb-battery.com.tw
 URL: www.csb-battery.com

CSB BATTERY TECHNOLOGIES, INC.,
NORTH AMERICA HEADQUARTERS
 Tel : 1-619-710-0188
 Fax: 1-619-710-0189
FORT WORTH SALES OFFICE
 Tel : 1-817-244-7777 / (800)3-CSB-USA
 Fax: 1-817-244-4445
 E-mail: csb@csb-battery.com

CSB BATTERY LOGISTICS
(SHANGHAI), CO., LTD.
 Tel : 86-21-5046-1622, 5046-0833
 Fax: 86-21-5046-3314
BEIJING OFFICE
 Tel : 86-10-6597-8060, 6597-8070
 Fax: 86-10-6597-8050
 E-mail: chinasis@csb-battery.com

CSB BATTERY (SINGAPORE) PTE., LTD.
 No. 2, Shenton Way, #15-02 S GX Centre 1,
 Singapore 068804
 Tel : 65-6534-3277
 Fax: 65-6534-3077
 E-mail: sales@csb-battery.com.sg

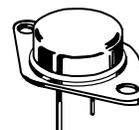
NPN Silicon Transistors

... fast switching speeds and high current capacity ideally suit these parts for use in switching regulators, inverters, wide-band amplifiers and power oscillators in industrial and commercial applications.

- High Speed – $t_f = 0.5 \mu s$ (Max)
- High Current – $I_{C(max)} = 30$ Amps
- Low Saturation – $V_{CE(sat)} = 2.5$ V (Max) @ $I_C = 20$ Amps

2N5038

**20 AMPERE
NPN SILICON
POWER TRANSISTOR
90 VOLTS
140 WATTS**



**CASE 1-07
TO-204AA
(TO-3)**

***MAXIMUM RATINGS**

Rating	Symbol	Value	Unit
Collector–Base Voltage	V_{CBO}	150	Vdc
Collector–Emitter Voltage	V_{CEV}	150	Vdc
Emitter–Base Voltage	V_{EBO}	7	Vdc
Collector Current – Continuous Peak (1)	I_C I_{CM}	20 30	Adc
Base Current – Continuous	I_B	5	Adc
Total Device Dissipation @ $T_C = 25^\circ C$ Derate above $25^\circ C$	P_D	140 0.8	Watts W/ $^\circ C$
Operating and Storage Junction Temperature Range	T_J, T_{stg}	-65 to +200	$^\circ C$

THERMAL CHARACTERISTICS

Characteristic	Symbol	Max	Unit
Thermal Resistance, Junction to Case	$R_{\theta JC}$	1.25	$^\circ C/W$

*Indicates JEDEC Registered Data.

(1) Pulse Test: Pulse Width ≤ 10 ms, Duty Cycle $\leq 50\%$.

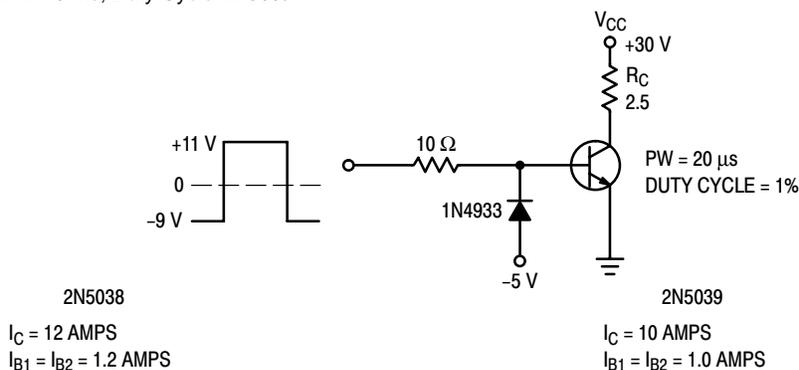


Figure 1. Switching Time Test Circuit

2N5038

*ELECTRICAL CHARACTERISTICS ($T_C = 25^\circ\text{C}$ unless otherwise noted)

Characteristic	Symbol	Min	Max	Unit
OFF CHARACTERISTICS				
Collector–Emitter Sustaining Voltage (2) ($I_C = 200\text{ mAdc}$, $I_B = 0$)	$V_{CEO(sus)}$	90	–	Vdc
Collector Cutoff Current ($V_{CE} = 140\text{ Vdc}$, $V_{BE(off)} = 1.5\text{ V}$) ($V_{CE} = 100\text{ Vdc}$, $V_{BE(off)} = 1.5\text{ Vdc}$, $T_C = 150^\circ\text{C}$)	I_{CEX}	–	50 10	mAdc
Emitter Cutoff Current ($V_{EB} = 5\text{ Vdc}$, $I_C = 0$) ($V_{EB} = 7\text{ Vdc}$, $I_C = 0$)	I_{EBO}	–	5 50	mAdc

ON CHARACTERISTICS (2)

DC Current Gain ($I_C = 12\text{ Adc}$, $V_{CE} = 5\text{ Vdc}$)	h_{FE}	20	100	–
Collector–Emitter Saturation Voltage ($I_C = 20\text{ Adc}$, $I_B = 5\text{ Adc}$)	$V_{CE(sat)}$	–	2.5	Vdc
Base–Emitter Saturation Voltage ($I_C = 20\text{ Adc}$, $I_B = 5\text{ Adc}$)	$V_{BE(sat)}$	–	3.3	Vdc

DYNAMIC CHARACTERISTICS

Magnitude of Common–Emitter Small–Signal Short–Circuit Forward Current Transfer Ratio ($I_C = 2\text{ Adc}$, $V_{CE} = 10\text{ Vdc}$, $f = 5\text{ MHz}$)	$ h_{fe} $	12	–	–
---	------------	----	---	---

SWITCHING CHARACTERISTICS

RESISTIVE LOAD					
Rise Time	($V_{CC} = 30\text{ Vdc}$) ($I_C = 12\text{ Adc}$, $I_{B1} = I_{B2} = 1.2\text{ Adc}$)	t_r	–	0.5	μs
Storage Time		t_s	–	1.5	μs

*Indicates JEDEC Registered Data.

(2) Pulse Test: Pulse Width $\leq 300\ \mu\text{s}$, Duty Cycle $\leq 2\%$.

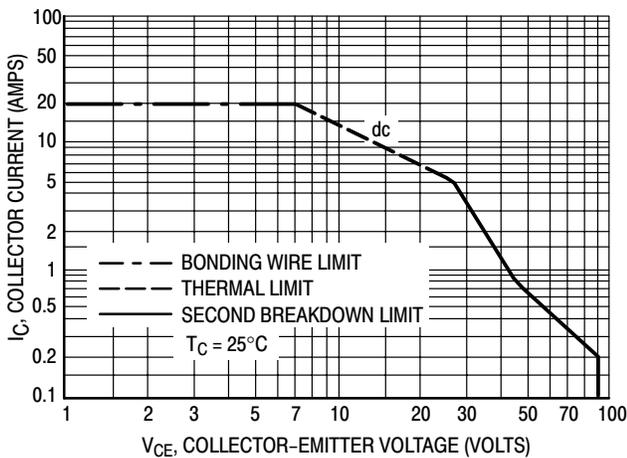


Figure 2. Forward Bias Safe Operating Area

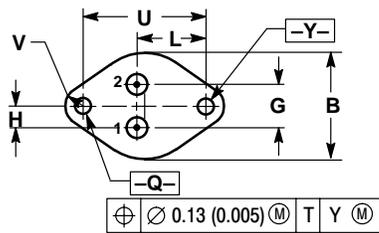
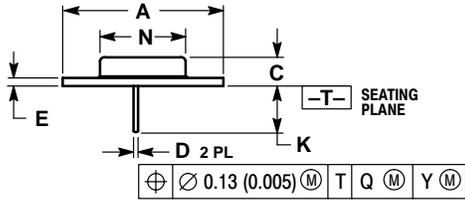
There are two limitations on the power handling ability of a transistor: average junction temperature and second breakdown. Safe operating area curves indicate $I_C - V_{CE}$ limits of the transistor that must be observed for reliable operation; i.e., the transistor must not be subjected to greater dissipation than the curves indicate.

Second breakdown pulse limits are valid for duty cycles to 10%. At high case temperatures, thermal limitations may reduce the power that can be handled to values less than the limitations imposed by second breakdown.

2N5038

PACKAGE DIMENSIONS

CASE 1-07 TO-204AA (TO-3) ISSUE Z



- NOTES:
1. DIMENSIONING AND TOLERANCING PER ANSI Y14.5M, 1982.
 2. CONTROLLING DIMENSION: INCH.
 3. ALL RULES AND NOTES ASSOCIATED WITH REFERENCED TO-204AA OUTLINE SHALL APPLY.

DIM	INCHES		MILLIMETERS	
	MIN	MAX	MIN	MAX
A	1.550 REF		39.37 REF	
B	---	1.050	---	26.67
C	0.250	0.335	6.35	8.51
D	0.038	0.043	0.97	1.09
E	0.055	0.070	1.40	1.77
G	0.430 BSC		10.92 BSC	
H	0.215 BSC		5.46 BSC	
K	0.440	0.480	11.18	12.19
L	0.665 BSC		16.89 BSC	
N	---	0.830	---	21.08
Q	0.151	0.165	3.84	4.19
U	1.187 BSC		30.15 BSC	
V	0.131	0.188	3.33	4.77

ON Semiconductor and  are trademarks of Semiconductor Components Industries, LLC (SCILLC). SCILLC reserves the right to make changes without further notice to any products herein. SCILLC makes no warranty, representation or guarantee regarding the suitability of its products for any particular purpose, nor does SCILLC assume any liability arising out of the application or use of any product or circuit, and specifically disclaims any and all liability, including without limitation special, consequential or incidental damages. "Typical" parameters which may be provided in SCILLC data sheets and/or specifications can and do vary in different applications and actual performance may vary over time. All operating parameters, including "Typicals" must be validated for each customer application by customer's technical experts. SCILLC does not convey any license under its patent rights nor the rights of others. SCILLC products are not designed, intended, or authorized for use as components in systems intended for surgical implant into the body, or other applications intended to support or sustain life, or for any other application in which the failure of the SCILLC product could create a situation where personal injury or death may occur. Should Buyer purchase or use SCILLC products for any such unintended or unauthorized application, Buyer shall indemnify and hold SCILLC and its officers, employees, subsidiaries, affiliates, and distributors harmless against all claims, costs, damages, and expenses, and reasonable attorney fees arising out of, directly or indirectly, any claim of personal injury or death associated with such unintended or unauthorized use, even if such claim alleges that SCILLC was negligent regarding the design or manufacture of the part. SCILLC is an Equal Opportunity/Affirmative Action Employer.

PUBLICATION ORDERING INFORMATION

NORTH AMERICA Literature Fulfillment:

Literature Distribution Center for ON Semiconductor
 P.O. Box 5163, Denver, Colorado 80217 USA
Phone: 303-675-2175 or 800-344-3860 Toll Free USA/Canada
Fax: 303-675-2176 or 800-344-3867 Toll Free USA/Canada
Email: ONlit@hibbertco.com
 Fax Response Line: 303-675-2167 or 800-344-3810 Toll Free USA/Canada

N. American Technical Support: 800-282-9855 Toll Free USA/Canada

EUROPE: LDC for ON Semiconductor – European Support

German Phone: (+1) 303-308-7140 (Mon-Fri 2:30pm to 7:00pm CET)
Email: ONlit-german@hibbertco.com
French Phone: (+1) 303-308-7141 (Mon-Fri 2:00pm to 7:00pm CET)
Email: ONlit-french@hibbertco.com
English Phone: (+1) 303-308-7142 (Mon-Fri 12:00pm to 5:00pm GMT)
Email: ONlit@hibbertco.com

EUROPEAN TOLL-FREE ACCESS*: 00-800-4422-3781

*Available from Germany, France, Italy, UK, Ireland

CENTRAL/SOUTH AMERICA:

Spanish Phone: 303-308-7143 (Mon-Fri 8:00am to 5:00pm MST)
Email: ONlit-spanish@hibbertco.com
Toll-Free from Mexico: Dial 01-800-288-2872 for Access –
 then Dial 866-297-9322

ASIA/PACIFIC: LDC for ON Semiconductor – Asia Support

Phone: 1-303-675-2121 (Tue-Fri 9:00am to 1:00pm, Hong Kong Time)
Toll Free from Hong Kong & Singapore:
001-800-4422-3781
Email: ONlit-asia@hibbertco.com

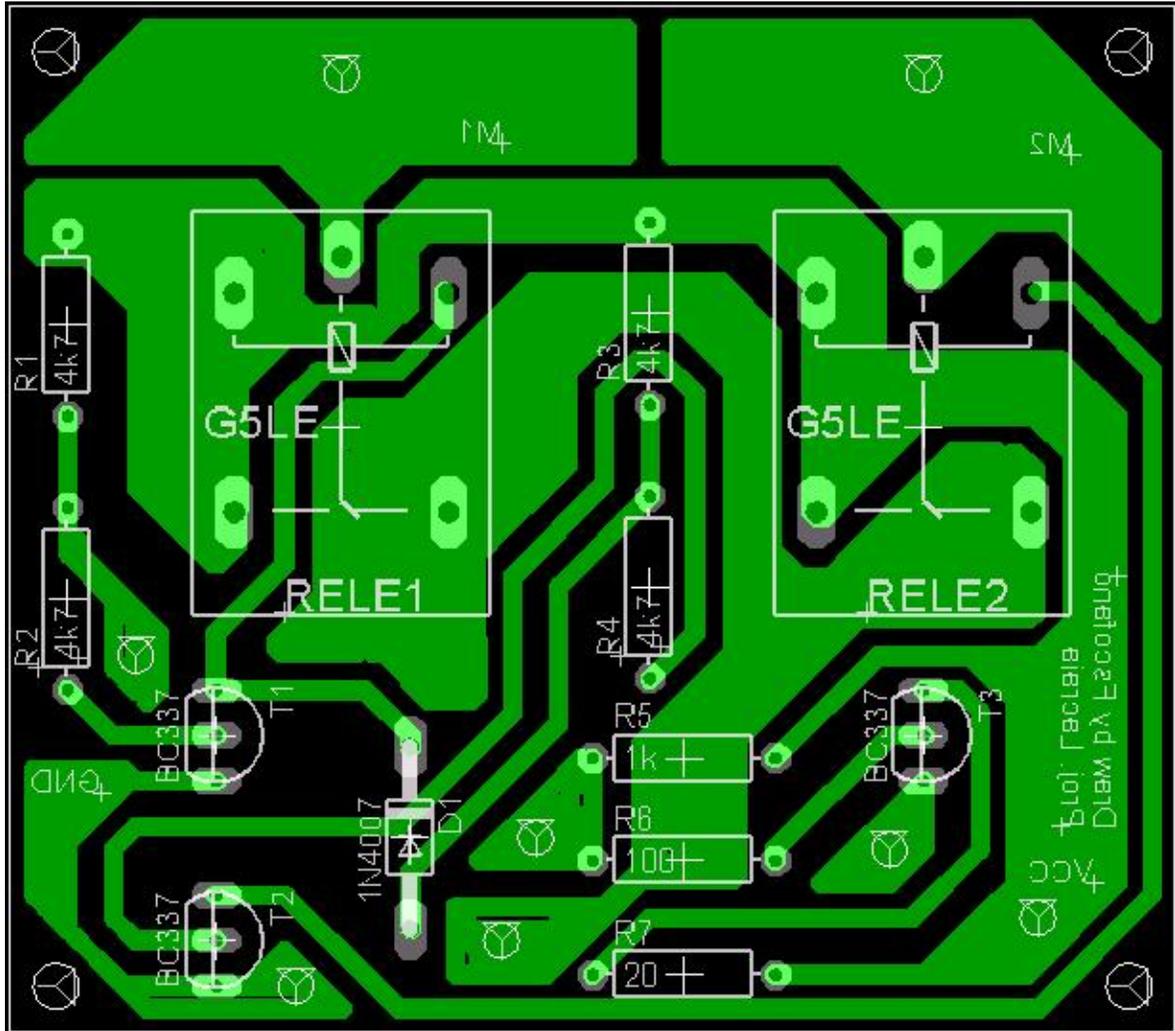
JAPAN: ON Semiconductor, Japan Customer Focus Center

4-32-1 Nishi-Gotanda, Shinagawa-ku, Tokyo, Japan 141-0031
Phone: 81-3-5740-2700
Email: r14525@onsemi.com

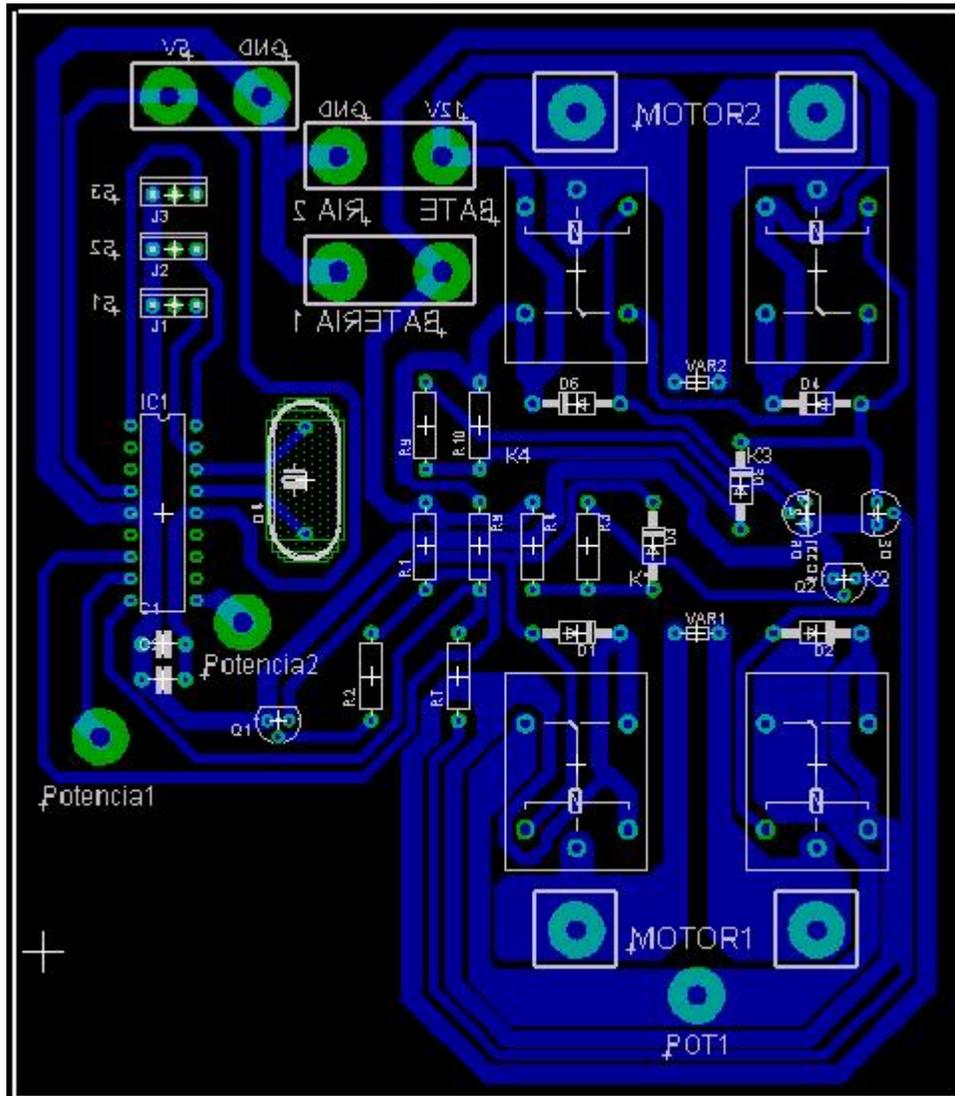
ON Semiconductor Website: <http://onsemi.com>

For additional information, please contact your local Sales Representative.

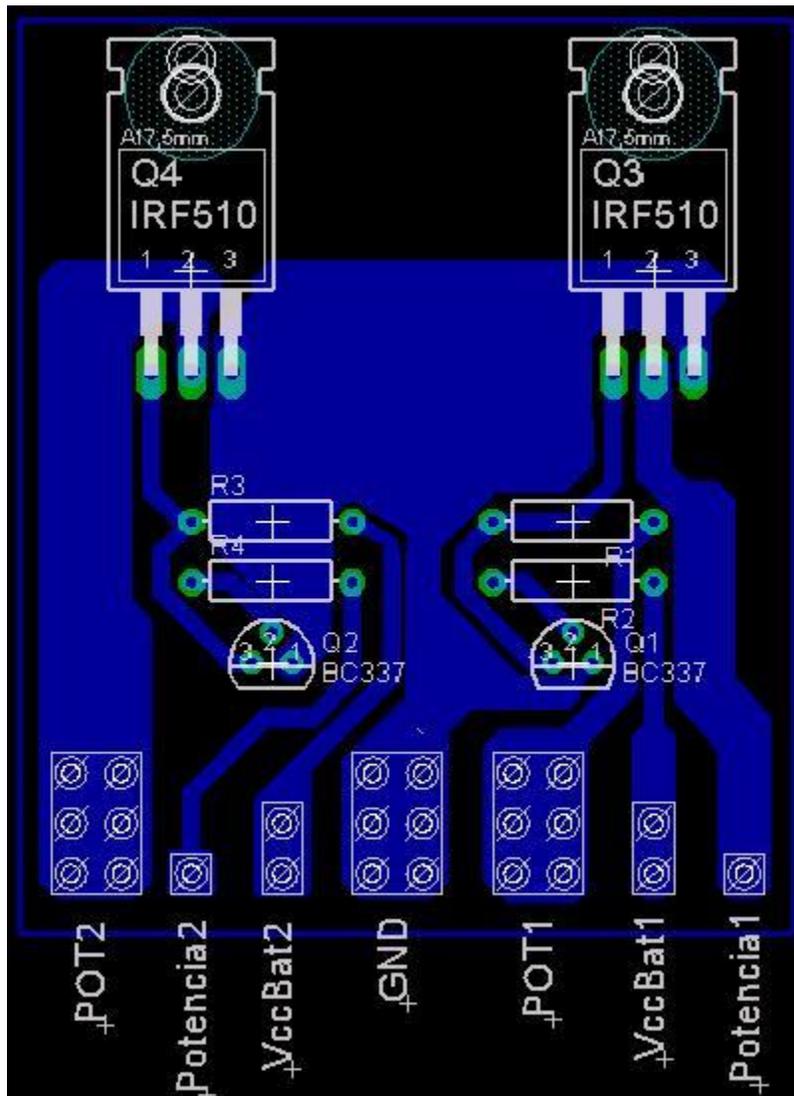
Layout da Placa Versão 1



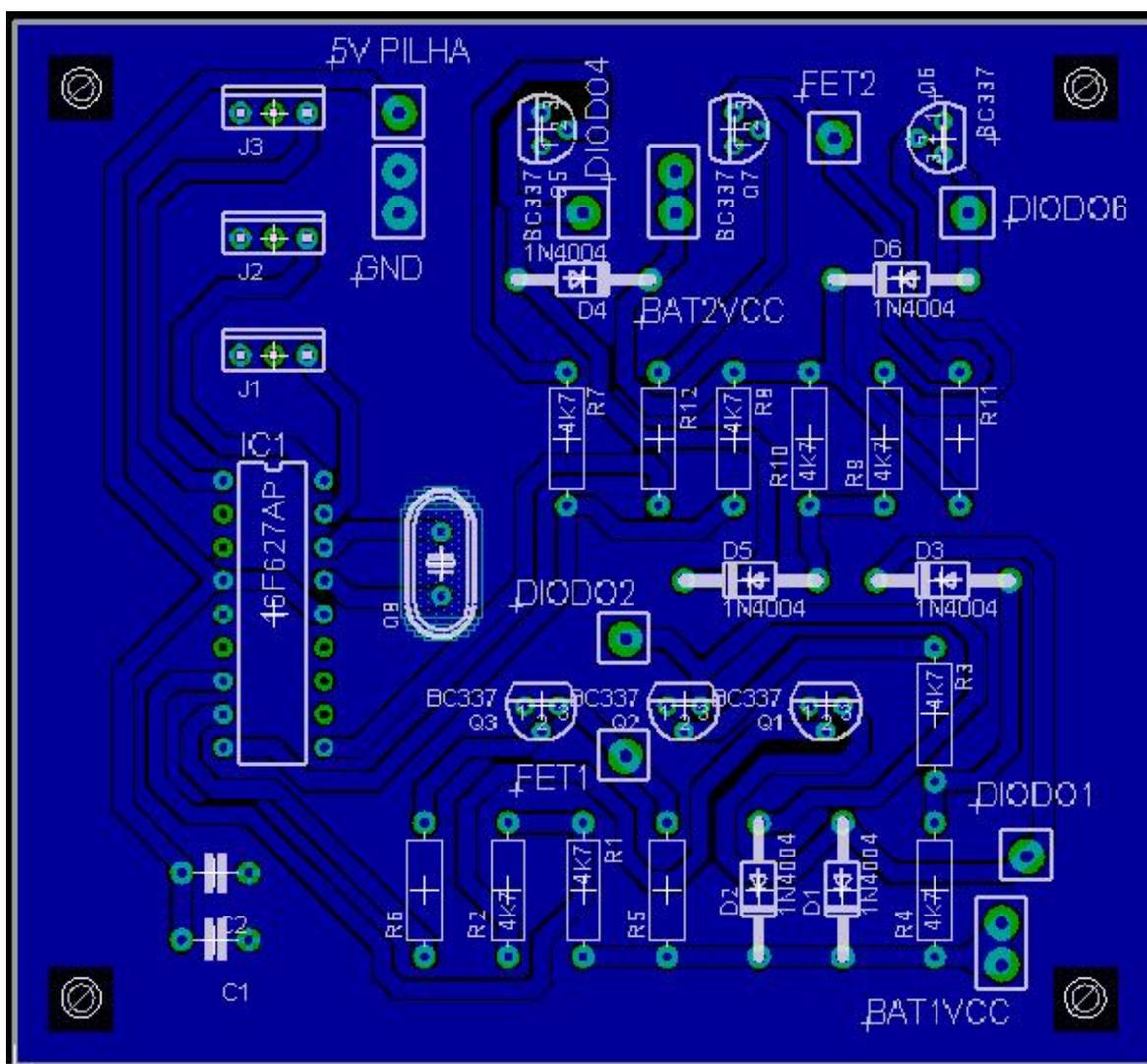
Layout da Placa Versão 2



Layout da Placa Versão 2 (Potência)



Layout da Placa Versão 3



Placa versão 1:

Relação de componentes

- 2 Relés Metaltex A1RC2
- 4 Resistores $4k7\Omega$
- 1 Resistor $1k\Omega$
- 1 Resistor 100Ω
- 1 Resistor 20Ω
- 1 Diodo 1N4007
- 3 Transistores NPN BC337

Placa versão 2:

Relação de componentes

- 4 Relés Metaltex A1RC2
- 8 Resistores $4k7\Omega$
- 1 Soquete 18 pinos
- 1 PIC 16F84A
- 1 Capacitor $0.1\mu F$
- 1 Capacitor $47nF$
- 1 Cristal 4MHz
- 3 conjuntos de terminais com 3 pinos cada
- 4 Transistores NPN BC337
- 2 Varistores 5K 50V

Potência

- 2 POWER MOSFETS IRF 3205
- 2 Transistores NPN BC337
- 2 Resistores $10k\Omega$
- 2 Resistores $1k\Omega$
- 2 Dissipadores

Placa versão 3:

Relação de componentes

- 8 Resistores 4k7 Ω
- 2 Resistores 10k Ω
- 2 Resistores 1k Ω
- 1 Soquete 18 pinos
- 1 PIC 16F84A
- 1 Capacitor 0.1 μ F
- 1 Capacitor 47nF
- 1 Cristal 4MHz
- 3 conjuntos de terminais com 3 pinos cada
- 6 Transistores NPN BC337

Potência

- 2 POWER MOSFETS IRF 3205
- 2 Dissipadores (para TO-3)

Projeto Final – Potência (a placa versão 3 continuou igual)

Relação de componentes

- 8 POWER MOSFETS IRF 3205
- 2 Dissipadores anodizados DM119K
- 2 Barras Sindal de 5 posições
- 4 Relés Metaltex SC1RC2

Outros:

- Fios Tiaflex 6mm²
- Fios 1,5mm²
- Terminais 90°
- Terminais 180°
- Conectores DB9
- Conectores 2 posições com capa (motores)
- Conectores metálicos (baterias)

