

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FERNANDO LUIZ RIBEIRO

PROJETO DE DIPLOMAÇÃO

CORTADOR DE GRAMA AUTOMATIZADO

Porto Alegre

2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

CORTADOR DE GRAMA AUTOMATIZADO

Projeto de Diplomação apresentado ao Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para Graduação em Engenharia Elétrica.

ORIENTADOR: Prof. Dr. Yeddo Braga Blauth

Porto Alegre
2011

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

FERNANDO LUIZ RIBEIRO

CORTADOR DE GRAMA AUTOMATIZADO

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: _____

Prof. Dr. Yeddo Braga Blauth, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina –
Florianópolis, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. MSc. Tiarajú Vasconcellos Wagner, UFRGS

Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Minas Gerais – Belo Horizonte, Brasil

Prof. Dr. Yeddo Braga Blauth, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal de Santa Catarina – Florianópolis, Brasil

Porto Alegre, julho de 2011.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais em especial e a todos aqueles que me apoiaram durante minha graduação.

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Ao Professor Yeddo Braga Blauth, pela orientação na realização deste trabalho.

Aos meus pais Marcelo e Carmen, por todo apoio e suporte.

À minha noiva Ana Paula por todo apoio e incentivo.

Aos meus irmãos André e Rafael e as famílias Androvandi e Moresco pelo companheirismo durante o curso.

Aos colegas do TRE-RS por toda a cooperação durante minha formação acadêmica.

RESUMO

O presente trabalho descreve o projeto e a implementação de uma máquina de corte de grama automatizada. O objetivo desta automação é eliminar o trabalho físico do operador responsável pela movimentação da máquina em terrenos extensos. Um cortador de grama facilmente encontrado no comércio local é utilizado como base para o desenvolvimento do projeto. Dois motores de corrente contínua são acoplados nas rodas traseiras para tracionar a máquina cabendo ao operador controlar o movimento a distância. Uma bateria automotiva é utilizada para a alimentação dos motores de tração e circuitos de controle. Um sistema de controle remoto de baixo custo foi desenvolvido para esta aplicação utilizando-se módulos de rádio frequência e circuitos integrados codificadores e decodificadores. Os comandos emitidos pelo operador acionam um conjunto de relés para o controle de direção da máquina. Duas velocidades podem ser selecionadas para utilização em grama alta ou baixa, controle este feito por dois circuitos independentes baseados no circuito integrado TL494 e transistores mosfets.

Palavras-chaves: Engenharia Elétrica. Eletrônica de Potência. Automação e Controle. Eletrônica e Instrumentação.

ABSTRACT

This document describes the design and implementation of an automated machine for cutting grass. The goal of this automation is to eliminate the physical work of the operator responsible for moving the machine in large grounds. A lawn mower machine easily found in local market is used as the basis for project development. Two DC motors are coupled to the rear wheels pull the machine falling to the operator remote control the movement. An automotive battery is used for powering the traction motors and control circuits. A system of low cost remote control was developed for this application using radio frequency modules and encoders and decoders integrated circuits. The commands issued by the operator triggers a set of relays to control the machine direction. Two speeds can be selected for use in tall or low grass; this control is done by two independent circuits based on MOSFETS transistors and TL494 integrated circuits.

**Keywords: Electrical Engineering. Power Electronics. Automation and Control.
Electronic and Instrumentation.**

SUMÁRIO

| | |
|---|-----------|
| 1 INTRODUÇÃO | 12 |
| 2 OBJETIVO | 14 |
| 3 ANÁLISE DE ALTERNATIVAS | 15 |
| 4 CIRCUITOS DESENVOLVIDOS | 19 |
| 4.1 Circuito Transmissor e Circuito Receptor | 20 |
| 4.2 Circuito de Chaveamento dos Motores | 24 |
| 4.3 Circuito PWM | 28 |
| 4.4 Descrição da Montagem Mecânica | 34 |
| 5 RESULTADOS ALCANÇADOS..... | 39 |
| 6 CONCLUSÃO..... | 45 |
| 7 REFERÊNCIAS | 47 |

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

| | |
|--|----|
| Fig. 3.1: Cortador de grama CE50M Tramontina | 16 |
| Fig. 4.1: Visão geral do sistema desenvolvido | 19 |
| Fig. 4.2: Circuito transmissor | 20 |
| Fig. 4.3: Circuito receptor..... | 20 |
| Fig. 4.4: Módulos de RF RR3 e RT4..... | 22 |
| Fig. 4.5: Foto do circuito transmissor..... | 23 |
| Fig. 4.6: Foto do circuito receptor | 23 |
| Fig. 4.7: Circuito simplificado de chaveamento dos motores | 24 |
| Fig. 4.8: Circuito de chaveamento dos motores | 27 |
| Fig. 4.9: Foto do circuito de chaveamento dos motores | 28 |
| Fig. 4.10: Circuito PWM | 29 |
| Fig. 4.11: Simulação do PWM para velocidade de 0,53 m/s | 32 |
| Fig. 4.12: Simulação do PWM para velocidade de 0,73 m/s | 32 |
| Fig. 4.13: Foto do circuito PWM..... | 33 |
| Fig. 4.14: Primeira tentativa de acoplamento do motor | 34 |
| Fig. 4.15: Motor utilizado no projeto | 35 |
| Fig. 4.16: Fixação da roda ao eixo do motor | 36 |
| Fig. 4.17: Fixação do motor ao chassi | 37 |
| Fig. 4.18: Suporte metálico das rodas dianteiras | 37 |
| Fig. 4.19: Visão geral da mecânica | 38 |
| Fig. 5.1: Tempos de subida e descida do PWM | 40 |
| Fig. 5.2: Tensões no circuito PWM para velocidade 0,73m/s | 41 |
| Fig. 5.3: Tensões no circuito PWM para velocidade 0,53m/s..... | 42 |
| Fig. 5.4: Recepção de dados com botões soltos | 43 |
| Fig. 5.5: Recepção de dados com botão Frente pressionado | 44 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 4.1 - Saídas ativadas para cada botão pressionado..... | 21 |
| Tabela 4.2 - Lógica de acionamento dos relés..... | 25 |
| Tabela 4.3 - Tensão média nos motores para diferentes aplicações..... | 33 |

LISTA DE ABREVIATURAS

CC: Corrente Contínua

CI: Circuito Integrado

DELET: Departamento de Engenharia Elétrica

MOSFET: Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor

PWM: Pulse Width Modulation

RF: Rádio Frequência

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

1. INTRODUÇÃO

Atualmente, diversos tipos de máquinas são utilizadas em residências e empresas com a finalidade de automatizar atividades rotineiras, facilitando trabalhos que antes demandavam esforço físico e tempo. Áreas com grandes extensões, como sítios, praças, canteiros ou mesmo pequenos jardins necessitam de cuidados constantes quanto ao corte grama, seja com a finalidade de saneamento, segurança ou apenas estética. Campos esportivos como campos de golfe, futebol e outros também necessitam do uso constante de máquinas de corte para a manutenção destas áreas verdes, considerando-se também o fato de que o corte periódico é importante, pois fortalece o desenvolvimento dos gramados.

Terrenos em acentuado aclive tornam a tarefa de corte de grama ainda mais difícil. Dias de verão muito quentes ou o frio intenso do inverno podem causar desconforto para os usuários, lembrando-se também que as máquinas elétricas de corte atuais têm como recomendação dos fabricantes a sua não utilização em gramados molhados por risco de choque elétrico.

A eficiência e a confiabilidade destas máquinas vêm aumentando com o passar dos anos. Hoje se encontram modelos com motor a gasolina ou elétrico, porém os usuários destes equipamentos ainda executam grande parte de trabalho físico com o constante deslocamento pelos terrenos e jardins. Apenas recentemente estão surgindo máquinas com um nível maior de automatização. Estas máquinas dificilmente são encontradas no Brasil e, as poucas opções encontradas, ainda são de custo elevado.

O presente projeto busca facilitar o trabalho de corte de grama automatizando um cortador para que este possa ser movimentado à distância. O esforço repetitivo do usuário, ao empurrar a máquina pelo terreno, será substituído por um controle remoto a partir do qual o

operador irá enviar comandos para o acionamento dos motores elétricos responsáveis pelo movimento do cortador.

O capítulo 2 descreve brevemente o objetivo deste projeto. No capítulo 3 relatam-se as análises de alternativas e as opções adotadas para o desenvolvimento deste trabalho. Os circuitos desenvolvidos são descritos no capítulo 4. Na seção 4.1 são explicados os Circuitos Transmissor e Receptor. Na seção 4.2 é descrito em detalhes o Circuito de Chaveamento dos Motores, na seção 4.3 desenvolve-se o Circuito PWM utilizado para o controle de velocidade dos motores enquanto na seção 4.4 relatam-se detalhes da construção mecânica. O capítulo 5 destina-se a apresentação dos resultados alcançados.

2. OBJETIVO

O objetivo da construção de uma máquina controlada remotamente é facilitar o trabalho que normalmente existe com as atuais máquinas, eliminando o esforço físico do operador. O objetivo, portanto, é que o operador da máquina envie comandos através de um controle remoto para que motores elétricos tracionem o cortador de grama pelo terreno.

Uma bateria automotiva de chumbo ácido de 12Vcc será utilizada para fornecer energia aos motores de tração. O controle da velocidade da máquina será feito através de dois circuitos PWM, um para cada motor, com duas velocidades fixas para o corte de grama alta ou baixa. Transistores mosfets serão utilizados para o chaveamento dos motores enquanto que contatos de relés serão responsáveis pela inversão no sentido de rotação dos mesmos.

3. ANÁLISE DE ALTERNATIVAS

As diversas alternativas para a execução deste projeto foram analisadas considerando-se a disponibilidade das peças no mercado, a facilidade de montagem e o custo dos componentes envolvidos.

A primeira decisão tomada foi com relação ao cortador de grama a ser utilizado como base para o projeto. A idéia de se utilizar um cortador convencional de baixo custo, encontrado facilmente no mercado, foi descartada, pois estes equipamentos possuem rodas de pequeno diâmetro e de material plástico. Estas rodas tornariam difícil o acoplamento com os motores cc e poderiam girar em falso sobre a grama. A pouca robustez destas rodas e sua quebra freqüente junto ao eixo também foram motivo para descarte deste tipo de cortador.

As demais alternativas eram: utilizar um cortador disponível no mercado com rodas melhores e maior robustez ou construir um chassi de ferro ou alumínio com rodas maiores e acoplar um cortador convencional (sem suas rodas originais) ao chassi construído. A opção adotada foi utilizar um cortador disponível, equipamento este com boa robustez, rodas de maior diâmetro e com rolamentos. O cortador utilizado foi o modelo CE50M da Tramontina (Fig. 3.1).

A idéia inicial era utilizar neste projeto um motor a gasolina para a lâmina de corte já que os motores elétricos para esta função possuem potências elevadas, 2.500W no caso do CE50M, não sendo recomendada sua alimentação por bateria devido a baixa autonomia. Assim, seria utilizado um motor a gasolina para a lâmina de corte e motores elétricos, alimentados pela bateria, apenas para a movimentação, tornando o sistema sem fio. Como o cortador de grama disponível para este projeto possui motor elétrico para movimentar a lâmina de corte, ele será ligado através de um cabo a uma tomada 220V. Futuramente o motor elétrico poderá ser substituído por um motor a gasolina.



Fig 3.1: Cortador de grama CE50M Tramontina.

A escolha deste cortador de grama trouxe um novo problema devido ao seu peso, duas vezes maior do que um cortador convencional de baixo custo. Este peso adicional requer maior potência dos motores de tração e conseqüentemente bateria de maior capacidade.

A bateria utilizada neste projeto é uma bateria automotiva Bosch S4x40d de 12V e 40Ah, escolhida por estar disponível apesar de não ser a mais indicada para este projeto. Uma bateria tipo tracionária seria mais indicada, pois oferece corrente constante por longo período de tempo e possibilita várias descargas e recargas. São chamadas de baterias de ciclo profundo. As baterias automotivas, chamadas baterias de arranque, são projetadas para fornecer grande quantidade de corrente em um curto espaço de tempo (durante a partida do automóvel) diferentemente da bateria tracionaria que é otimizada para operar por longos períodos, porém sem altas correntes de pico.

Os motores de tração utilizados nos primeiros testes foram dois Wapsa de 14Vcc. Estes motores de corrente contínua e ímãs permanentes possuem caixa redutora e são geralmente utilizados em limpadores de pára-brisas de automóveis. A falta de opção de motores CC de baixo custo levou a decisão de se testar estes motores no projeto.

Neste primeiro protótipo o acoplamento dos motores CC nas rodas do cortador de grama foi implementado com a utilização de pinhas e correntes de bicicletas, material este disponível e que possibilitou uma redução adequada da velocidade. No entanto, nos testes práticos estes motores e seus acoplamentos se mostraram pouco confiáveis, com constantes quedas de correias.

Os motores CC Wapsa foram então descartados neste projeto optando-se por motores usados, sem placa de identificação ou folha de dados, importados dos EUA. Os motores foram adquiridos por possuírem redução adequada com possibilidade de fixação das rodas diretamente ao seu eixo, eliminando-se assim o principal problema enfrentado com os motores Wapsa. Os motores foram adquiridos com custo quatro vezes inferior a similares encontrados no Brasil, incluindo-se o custo do transporte. Estes motores têm sua aplicação em mini scooters para movimentação humana e de carga. Possuem freio magnético composto por um selenóide que trava o eixo do rotor quando o mesmo não estiver energizado.

Um braço de metal foi construído para a fixação de duas rodas tipo rodízio na parte dianteira da máquina. Este braço foi fixado no lugar das rodas frontais com o objetivo de facilitar o giro do cortador de grama, já que a tração é feita pelas duas rodas traseiras. A opção de utilizar outro motor para girar as rodas dianteiras para virar a máquina foi descartada devido ao tipo de terreno a que se destina o uso da máquina ser acidentado. O giro das rodas dianteiras poderia então ficar comprometido por um desnível que impedisse seu giro lateral.

O sistema escolhido para o controle remoto é baseado na utilização de módulos de RF da empresa italiana Telecontrolli. Considerou-se a hipótese da utilização de rádio-controle de equipamentos de aerodelismo, porém a opção mais acessível foi a dos módulos RF.

A velocidade do cortador de grama não necessita ser variável, portanto optou-se pela escolha de duas velocidades fixas, uma velocidade menor para corte de grama alta e outra velocidade maior para utilização em grama baixa. Para o controle da velocidade dos motores

optou-se pela utilização de dois circuitos PWMs independentes baseados no circuito integrado TL494. Dentre as várias opções de circuitos integrados dedicados a geração e controle de sinal PWM, o CI TL494 foi escolhido por ser facilmente encontrado no comércio local e por sua ampla documentação disponível.

4. CIRCUITOS DESENVOLVIDOS

Uma visão geral do sistema desenvolvido pode ser vista na figura 4. Nesta figura o circuito transmissor envia para o circuito receptor os níveis de sinais para o acionamento dos motores. Os circuitos de chaveamento dos motores 1 e 2 são responsáveis pela alimentação dos motores, inversão de polaridade dos mesmos e liberação dos freios magnéticos. Os Circuitos PWM 1 e 2 controlam a velocidade dos motores através do chaveamento de mosfets para o terra.

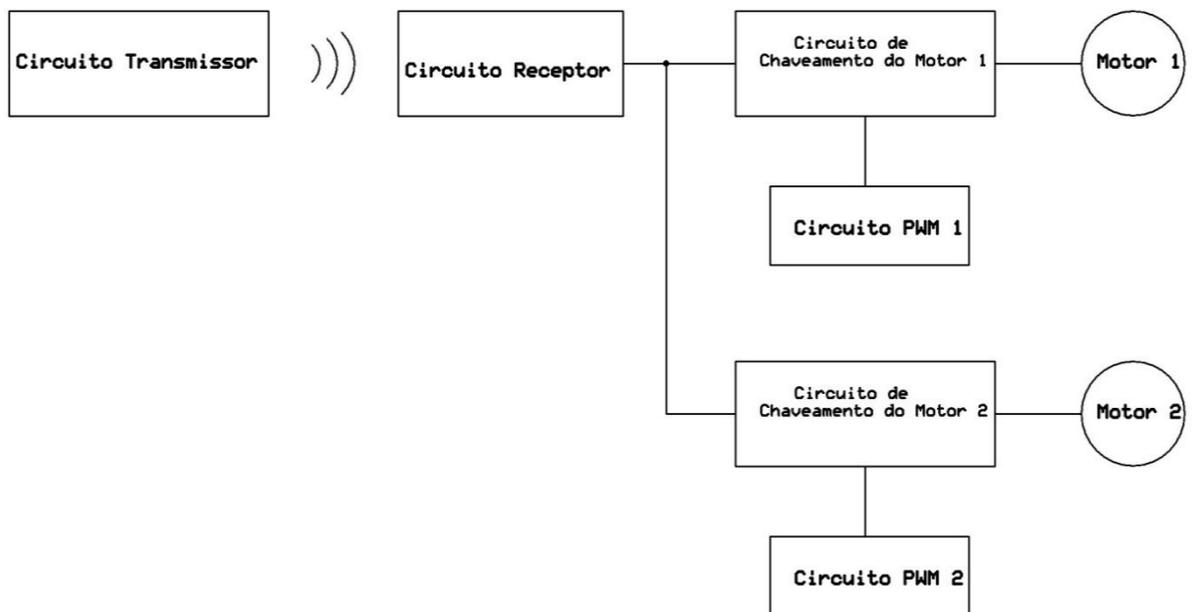


Fig. 4.1: Visão geral do sistema desenvolvido.

4.1 CIRCUITO TRANSMISSOR E CIRCUITO RECEPTOR

Após a análise de várias alternativas decidiu-se pela utilização do circuito transmissor mostrado na figura 4.2 e do circuito receptor mostrado na figura 4.3.

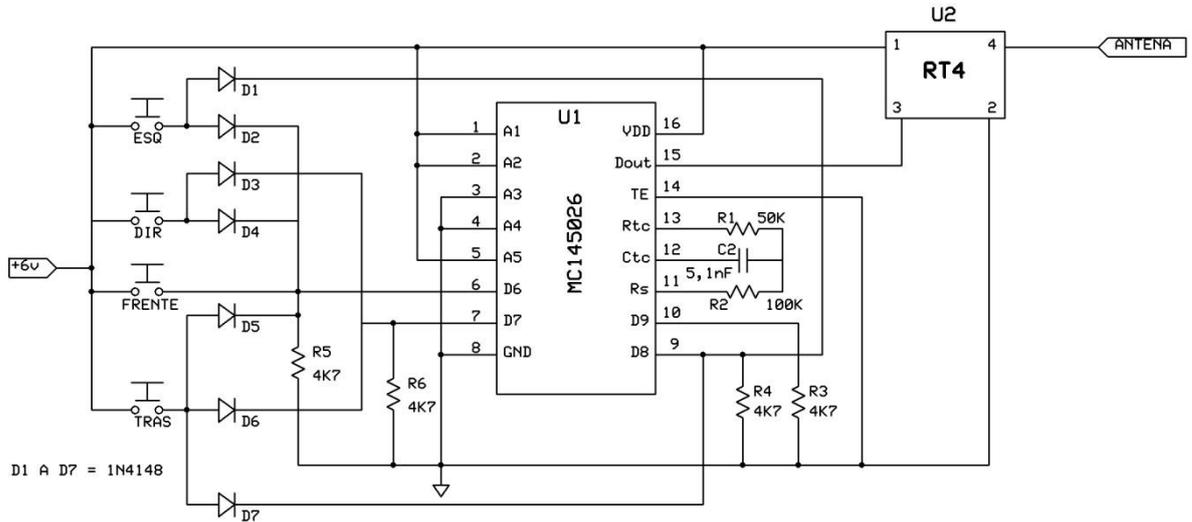


Fig. 4.2: Circuito transmissor.

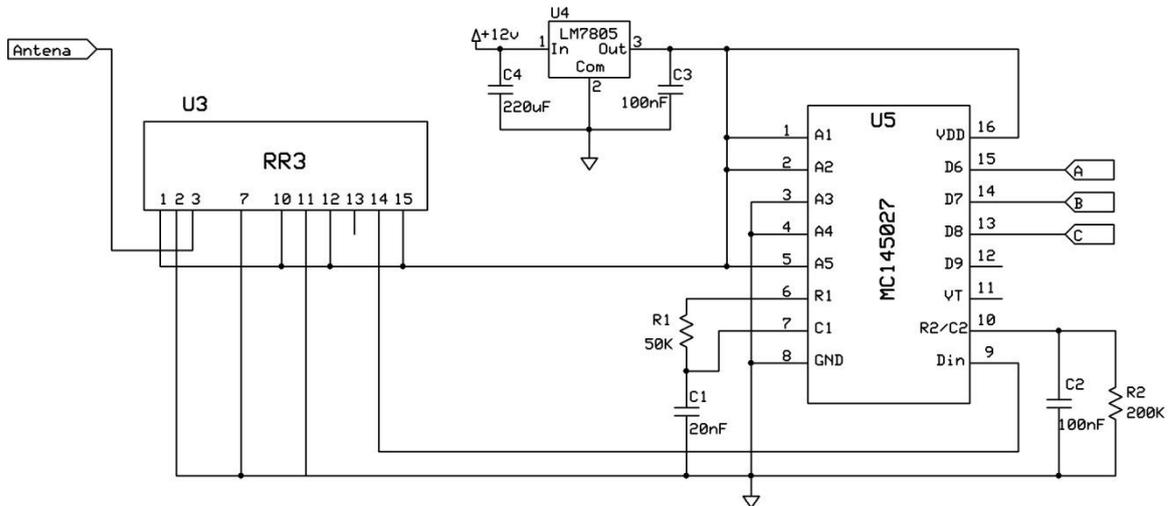


Fig. 4.3: Circuito receptor.

No circuito transmissor, o módulo RT4 transmite via ondas de rádio (RF) os dados codificados pelo circuito integrado (CI) U1. No circuito receptor, o módulo RR3 capta o sinal de RF transmitido e o CI U5 decodifica-o, apresentando os dados nas saídas A, B e C.

Na figura 4.2 notam-se os quatro botões do tipo campainha, denominados ESQ, DIR, FRENTE e TRÁS. Quando um botão é pressionado no circuito transmissor, alguns pinos do CI U1 passam do nível baixo para nível alto, ativando pinos correspondentes no CI U5 do receptor. A relação completa entre os botões do transmissor e as saídas do receptor é dada na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Saídas ativadas para cada botão pressionado.

| Circuito transmissor | | | Circuito receptor |
|----------------------|------------------|----------------------|-----------------------|
| Botão pressionado | Diodos acionados | Pinos ativados em U1 | Saídas ativadas em U5 |
| ESQ | D1 e D2 | 6 e 9 | A e C |
| DIR | D3 e D4 | 6 e 7 | A e B |
| FRENTE | - | 6 | A |
| TRÁS | D5, D6 e D7 | 6, 7 e 9 | A, B e C |

Como exemplo, quando o botão ESQ é pressionado, os pinos 6 e 9 de U1 passam do nível baixo para nível alto através dos diodos D1 e D2. Estes dados são codificados em U1 e transmitidos por U2. No receptor os dados são decodificados por U5, ativando as saídas A e C. Na seção 4.2 será visto como estas saídas serão responsáveis por um movimento do cortador de grama para a esquerda. Quando o botão ESQ for solto os pinos 6 e 9 de U1 retornam ao nível zero, devido aos resistores R4 e R5, levando as saídas A e C de U5 também para nível baixo.

O circuito do codificador U1 é similar ao sugerido no datasheet [3]. Os componentes R2, C2 e R1, ligados aos pinos 11, 12 e 13 de U1, foram dimensionados para uma frequência de operação do codificador de 1,71kHz. Analogamente, no circuito receptor, os componentes R1, C1, R2 e C2, ligados aos pinos 6, 7 e 10 de U5, também foram dimensionados para a mesma frequência de operação do decodificador.

A alimentação do circuito transmissor é feita por quatro pilhas AA de 1,5V totalizando 6V enquanto que a alimentação do circuito receptor é de 5V, provida por U4 que é ligado aos 12V da bateria automotiva.

Os pinos 1, 2 e 5 (A1, A2 e A5) de U1 são ligados ao positivo enquanto os pinos 3 e 4 (A3 e A4) são ligados ao terra. Estes pinos fazem o endereçamento do CI e estão configurados da maneira idêntica no circuito decodificador U5. O pino 14 de U1, no circuito transmissor, é ligado ao terra para habilitar a transmissão contínua dos estados do pino.

Os módulos de RF U3 e U2 utilizados neste projeto são o receptor RR3 [1] e o transmissor RT4 [2] da empresa italiana Telecontrolli. Este par facilita muito a construção de sistemas de rádio controle e é de baixo custo. O RR3 pode ser visto na figura 4.4 a esquerda e o RT4 pode ser visto na mesma figura a direita. A facilidade na utilização destes módulos híbridos está no fato de que eles não necessitam qualquer ajuste, pois sua frequência é ajustada a laser no processo de fabricação. São chamados módulos híbridos, pois possuem componentes discretos e integrados na mesma placa. Ambos os módulos de RF operam na frequência de 433,92 MHz.

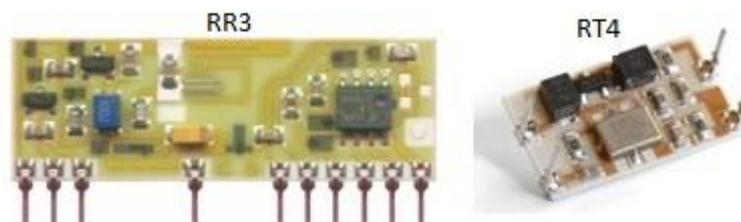


Fig. 4.4: Módulos de RF RR3 e RT4.

As figuras 4.5 e 4.6 mostram as fotos dos circuitos transmissor e receptor respectivamente.

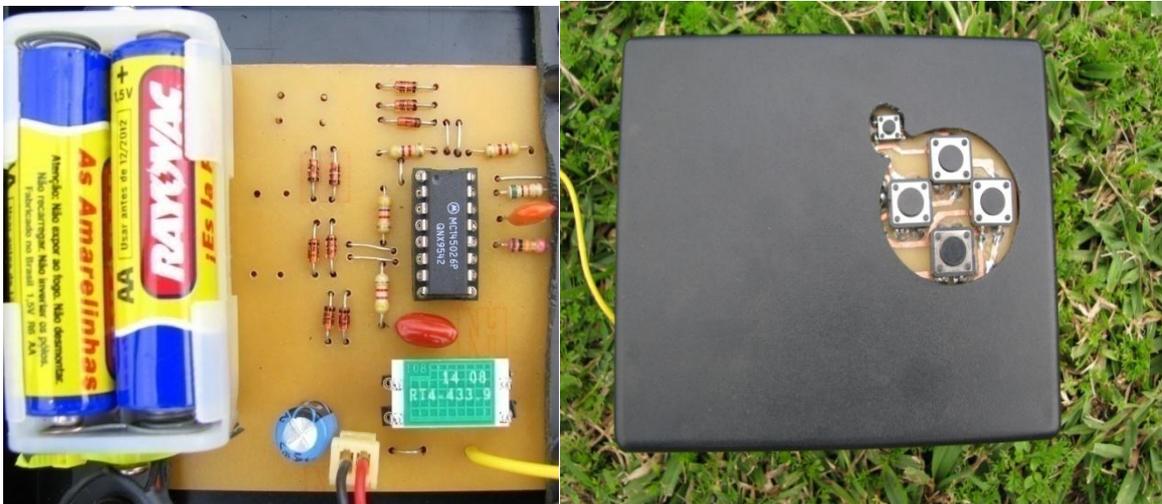


Fig. 4.5: Foto do circuito transmissor.

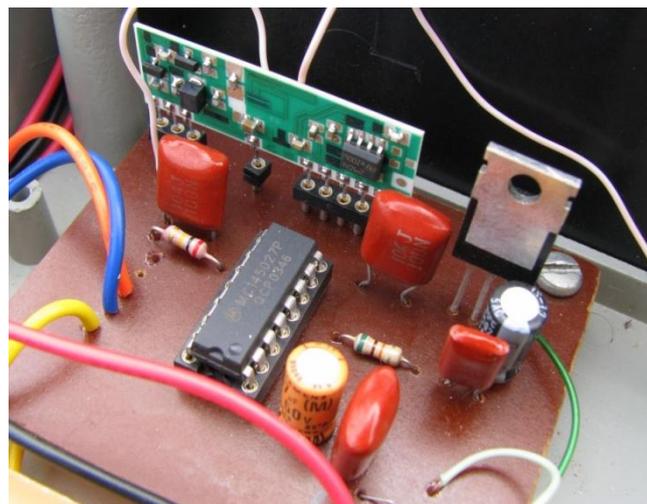


Fig. 4.6: Foto do circuito receptor.

4.2 Circuito de chaveamento dos motores

O circuito simplificado de chaveamento dos motores é mostrado na figura 4.7.

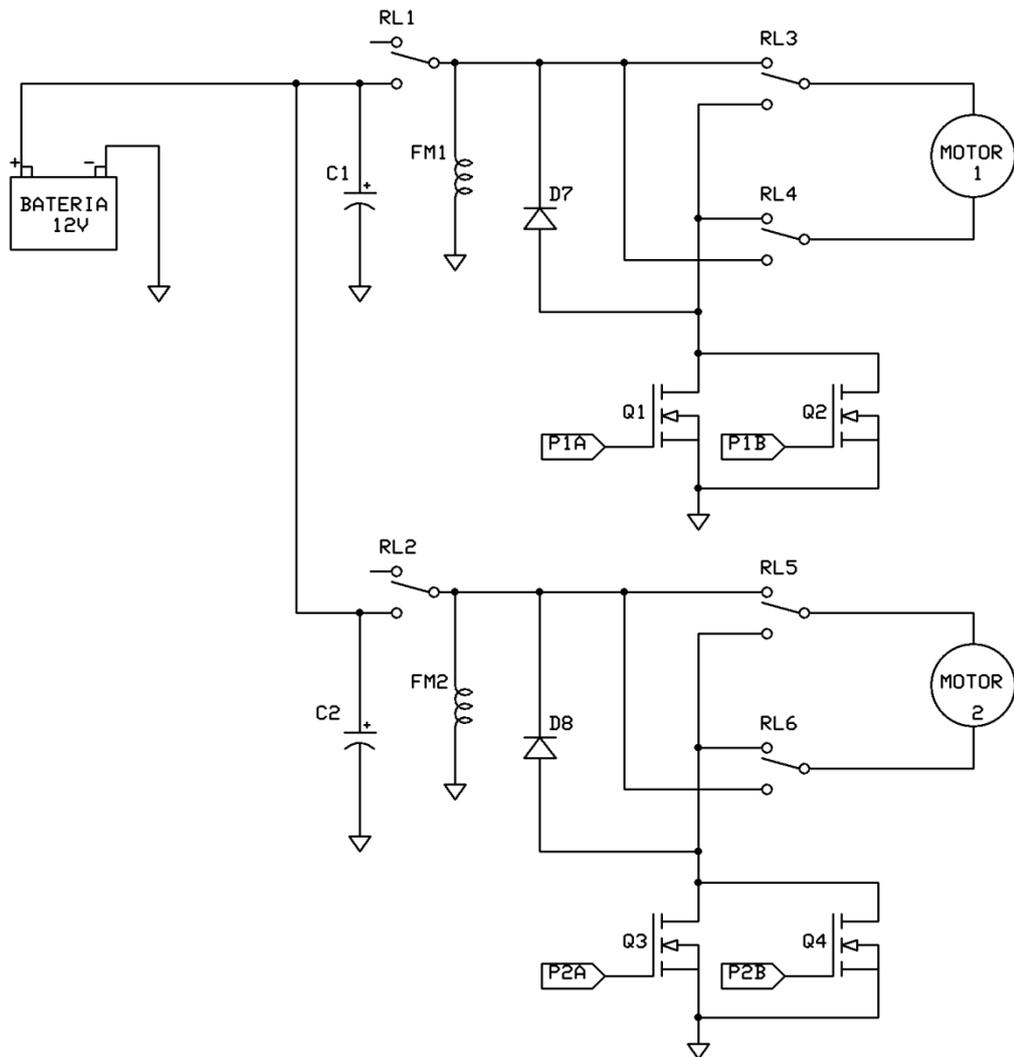


Fig. 4.7: Circuito simplificado de chaveamento dos motores.

Genericamente, os relés RL1 e RL2 ligam ou desligam os motores enquanto os relés RL3 e RL4 invertem o sentido de rotação do motor M1 e os relés RL5 e RL6 invertem o sentido de rotação do motor M2. Para a obtenção dos movimentos desejados foi implementada a lógica de acionamento dos relés mostrada na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Lógica de acionamento dos relés.

| Circuito transmissor | Circuito receptor | Circuito de chaveamento | Movimento dos motores | | |
|----------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------------|---------|----------|
| | | | Motor 1 | Motor 2 | Direção |
| Botão pressionado | Saídas ativadas em U5 | Relés acionados | Motor 1 | Motor 2 | Direção |
| ESQ | A e C | RL1, RL2, RL5 e RL6 | Frente | Trás | Esquerda |
| DIR | A e B | RL1, RL2, RL3 e RL4 | Trás | Frente | Direita |
| FRENTE | A | RL1 e RL2 | Frente | Frente | Frente |
| TRÁS | A, B e C | RL1 a RL6 | Trás | Trás | Trás |

Analisando a tabela 4.2 observamos que o acionamento do botão DIR, por exemplo, ativa os pinos A e B de U5 no circuito receptor. Estes pinos, por sua vez, serão responsáveis pelo acionamento dos relés RL1, RL2, RL3 e RL4. Os relés RL1 e RL2 conectam o positivo da bateria aos motores 1 e 2. Os mosfets Q1 a Q4 [8] tem seus gates ligados ao circuito PWM, que será visto na seção 4.3, e como o circuito PWM está sempre ativo, o motor 2 irá girar em sentido direto, ou seja, para frente já que os contatos dos relés RL5 e RL6 estão conectados diretamente. Já o motor 1 irá girar em sentido inverso, ou seja, para trás devido ao acionamento dos contatos dos relés RL3 e RL4 que invertem o sentido da corrente que percorre o motor. Desta forma o cortador de grama gira para a direita.

As quatro direções mostradas na tabela 4.2 são também descritas abaixo:

1 - Quando apenas o ponto A está em nível alto os relés RL1 e RL2 são ativados acionando os dois motores para frente.

2 - Caso A e B sejam ativados simultaneamente, ocorrerá a inversão do motor M1 enquanto M2 será acionado para frente fazendo com que o cortador de grama gire para a direita.

3 - Caso A e C sejam acionados simultaneamente, ocorrerá a inversão do motor M2 enquanto M1 será acionado para a frente, assim o cortador de grama gira para a esquerda.

4 - Quando A, B e C estiverem em nível alto os seis relés são ativados invertendo o sentido de rotação dos dois motores de forma que o cortador ande para trás.

Notam-se na figura 4.7 as duas bobinas FM1 e FM2 que são os freios eletromagnéticos internos dos motores 1 e 2. Quando a bobina é energizada o freio é desligado e o motor pode girar livremente. Quando a bobina não está energizada o eixo do motor fica travado.

Os relés utilizados são da He Li Shun, modelo HLS-T90(15F)-C, possuem bobinas de 12Vcc, com resistência de $154,9\Omega$ e contatos que podem chavear até 30A [4].

A figura 4.8 mostra o circuito de chaveamento dos motores completo.

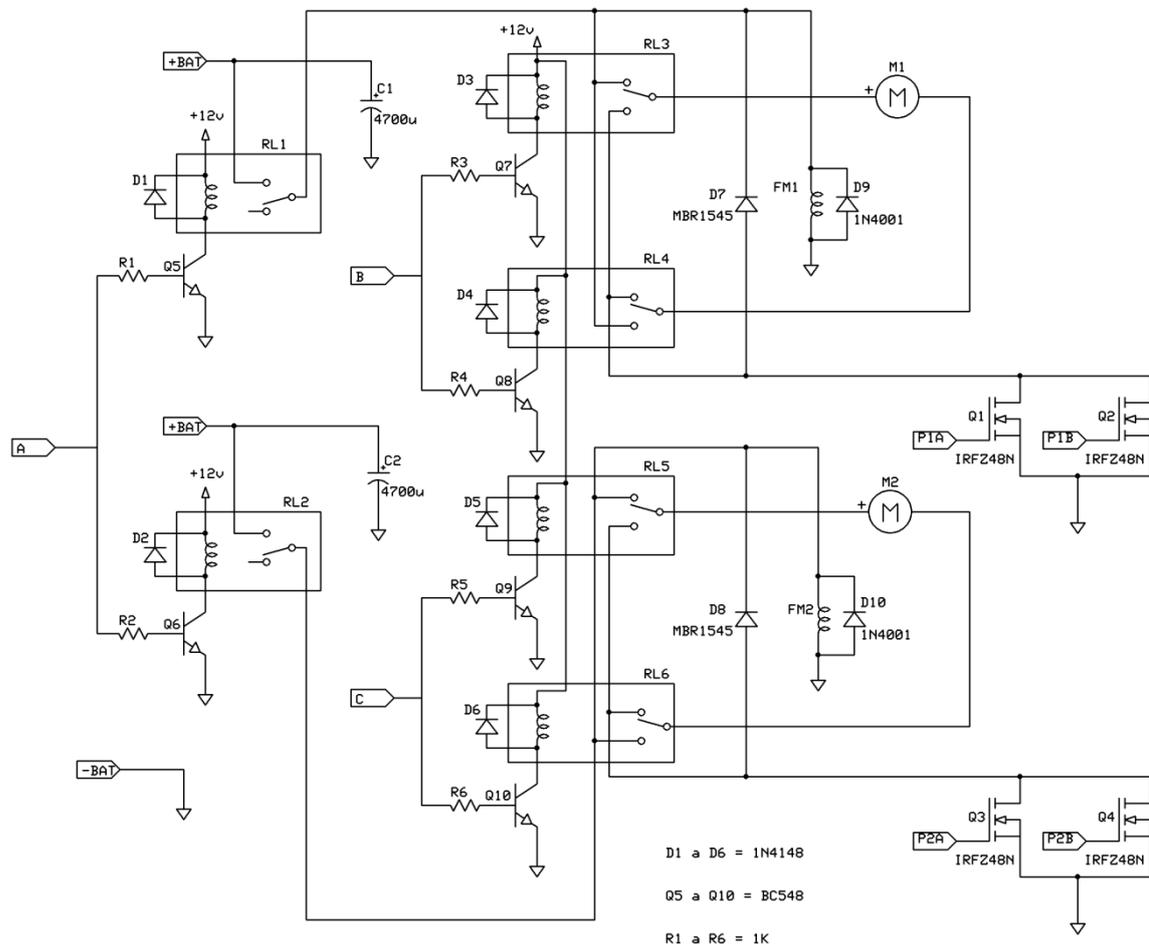


Fig. 4.8: Circuito de chaveamento dos motores.

Observa-se na figura 4.8 que, quando o ponto A estiver em nível alto, os transistores Q5 e Q6 acionam os relés RL1 e RL2. Estes relés ligam o positivo da bateria aos motores M1 e M2 através dos relés RL3 a RL6. Quando estes relés estão em repouso, pontos B e C em nível baixo, os motores giram em sentido direto. Quando os pontos B ou C passam para nível alto os relés invertem o sentido da corrente que passa pelos motores. Os transistores mosfets de potência Q1 a Q4 fornecem o terra para os motores. Os gates destes transistores, correspondentes aos pontos P1A, P1B, P2A e P2B, são ligados ao circuito PWM que será visto na seção 4.3. Dois mosfets em paralelo são usados para cada motor de forma a distribuir igualmente a corrente entre ambos. Diferentemente dos problemas que ocorrem em

arquiteturas em paralelo de transistores bipolares, a utilização de mosfets em paralelo é mais simples já que estes componentes possuem R_{ds-on} com coeficiente de temperatura positivo, assim quando a corrente entre dreno e source aumenta, a temperatura aumenta levando a um aumento de R_{ds-on} . Este aumento de R_{ds-on} causa uma diminuição na corrente. Esta dinâmica de funcionamento possibilita uma distribuição de corrente igual entre mosfets em paralelo [9].

A figura 4.9 mostra a foto do circuito de chaveamento dos motores.

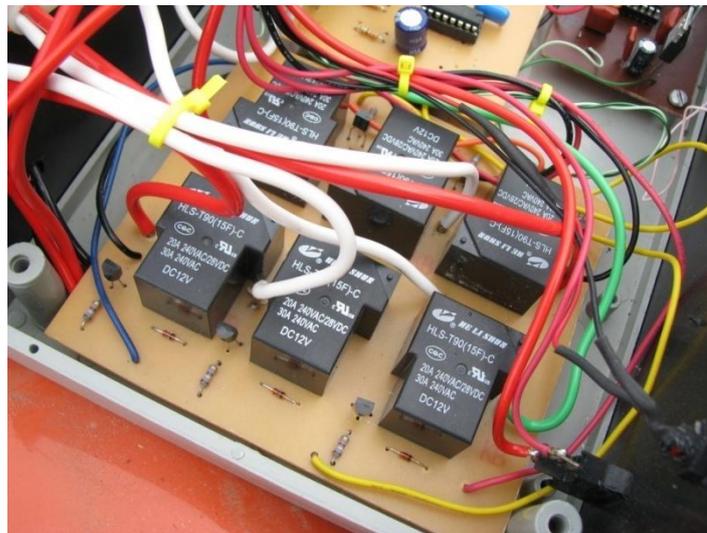


Fig. 4.9: Foto do circuito de chaveamento dos motores.

4.3 Circuito PWM

O circuito PWM tem por finalidade ajustar a velocidade dos motores para duas velocidades fixas, uma velocidade maior para corte de grama baixa e outra velocidade menor para corte de grama alta. Variando-se a largura dos pulsos aplicados aos gates Q1 a Q4 dos mosfets do circuito de chaveamento dos motores, altera-se a potência entregue aos motores e conseqüentemente sua velocidade.

Os dois circuitos PWMs desenvolvidos podem ser vistos na figura 4.10.

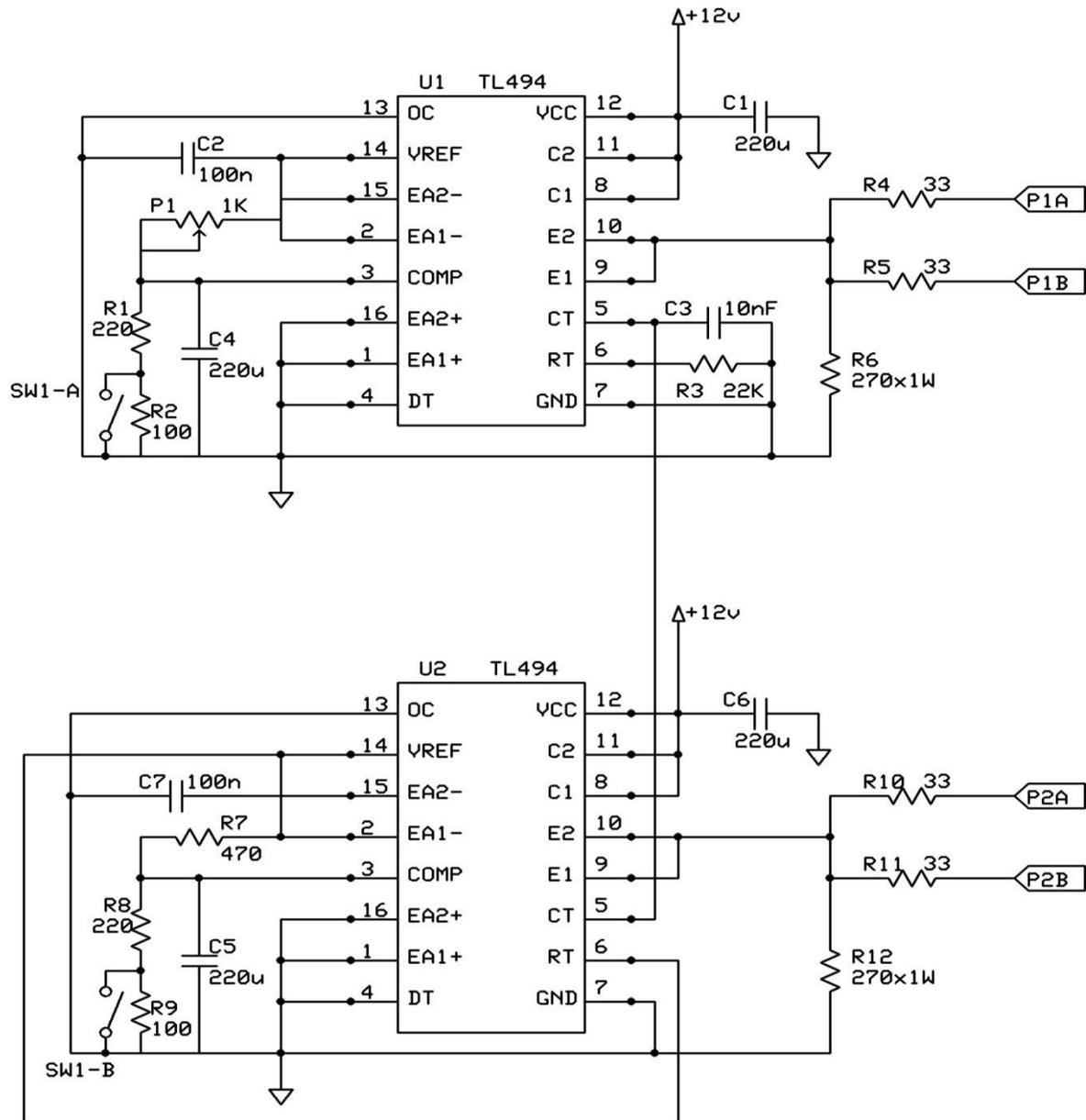


Fig. 4.10: Circuito PWM

Nota-se na figura 4.10 que dois circuitos PWMs foram desenvolvidos possibilitando ajuste diferenciado para cada motor. Este ajuste é importante para que o cortador de grama possa andar em linha reta sem desvios na trajetória. A utilização de dois circuitos PWMs

independentes visa também futuros desenvolvimentos para controle de velocidade e direção. Ambos os circuitos são baseados no circuito integrado TL494 [5, 6, 7]. Este circuito integrado é dedicado a função de geração e controle de sinais PWM e é muito utilizado em projetos de fontes chaveadas.

A frequência de chaveamento do PWM é dada por C3 e R3, pinos 5 e 6 de U1. Os componentes C3 e R3 foram dimensionados para uma frequência de 5kHz, valor típico para controle de velocidade de motores de corrente contínua. O CI U2 é ligado em *slave* para operar na mesma frequência de U1, assim o pino 5 do circuito integrado U1 é ligado ao pino 5 de U2 enquanto que o pino 6 de U2 fica conectado ao Vref, pino 14 de U2.

Os amplificadores de erro dos dois CIs, pinos 1, 2, 15 e 16, não são utilizados neste projeto estando, portanto com suas entradas inversoras conectadas aos 5Vcc da tensão de referência Vref, pino 14 de cada circuito integrado, e com suas entradas não-inversoras conectadas ao terra. O pino DT (dead time control), pino 4 dos CIs também não é utilizado, portanto é ligado diretamente ao terra. O pino 13 de ambos os circuitos integrados é conectado ao terra configurando a saída para que o PWM atue simultaneamente nos pinos 9 e 10. Estes pinos são então ligados aos gates do mosfets do circuito de chaveamento (seção 4.2) através das conexões P1A, P1B, P2A e P2B.

O controle da largura de pulso do PWM é feito através das entradas de *Feedback*, pino 3 ou Comp, de U1 e U2, figura 4.10. Nestas entradas utilizam-se divisores resistivos ligados a tensão de referência Vref, pino 14 de U1 e U2. Após a obtenção das velocidades adequadas, inicialmente feita através do ajuste de potenciômetros, estes foram substituídos pelos divisores resistivos. As tensões obtidas experimentalmente foram 2V para a velocidade baixa e 1,6V para a velocidade alta. Em U1 foi utilizado o trimpot multivoltas P1 para ajuste fino, de maneira a corrigir a diferença na rotação dos dois motores e possibilitar que o cortador mantenha sua trajetória em linha reta.

A chave SW1 seleciona a velocidade dos motores curto-circuitando um dos resistores do divisor de tensão. A chave quando selecionada atua tanto sobre U1 quanto sobre U2 (SW1A e SW1B). No circuito integrado U1 quando a chave SW1A é acionada o resistor R2 é curto-circuitado, assim o divisor de tensão fica entre o resistor R1 e o trimpot multivoltas P1, neste caso a tensão no pino 3 de U1 é 1,6 V e a velocidade de rotação dos motores é alta. Quando a chave está aberta o divisor de tensão funciona entre P1 e a soma dos resistores R1 e R2, a tensão no pino 3 neste caso é 2 V e a velocidade de rotação dos motores é baixa. O incremento da amplitude do sinal de controle *Feedback*, causa uma diminuição linear na largura de pulso de saída ocasionando portanto uma diminuição na velocidade de rotação dos motores. O funcionamento descrito para U1 é idêntico para U2. A velocidade do cortador de grama é de 0,73 m/s para utilização em grama baixa e de 0,53 m/s para utilização em grama alta.

A corrente máxima fornecida pelo pino de tensão de referência, pino 14 de U1 e U2, é de 10mA. A vantagem de se utilizar a tensão de referência é que esta se mantém estável mesmo com a variação da tensão de alimentação, ou seja, a tensão de referência se mantém constante em 5V mesmo quando a bateria automotiva que alimenta o circuito tiver uma diminuição de tensão de 12V para 11V por exemplo.

Diversas simulações foram feitas inicialmente para entender e dimensionar e posteriormente para confirmar o funcionamento do circuito PWM. Os resultados de algumas destas simulações podem ser vistas nas figuras 4.11 e 4.12. Estas figuras foram obtidas utilizando-se o osciloscópio do software simulador de circuitos Multisim, ligado ao gate de um mosfet. Ambas as figuras indicam a tensão do sinal PWM e do sinal dente de serra do oscilador. A base de tempo do osciloscópio está em 100 μ s e como o período completo está em duas divisões, o período é do sinal é de 200 μ s. Este período corresponde a frequência de 5kHz definida através de R3 e C3 no circuito PWM.

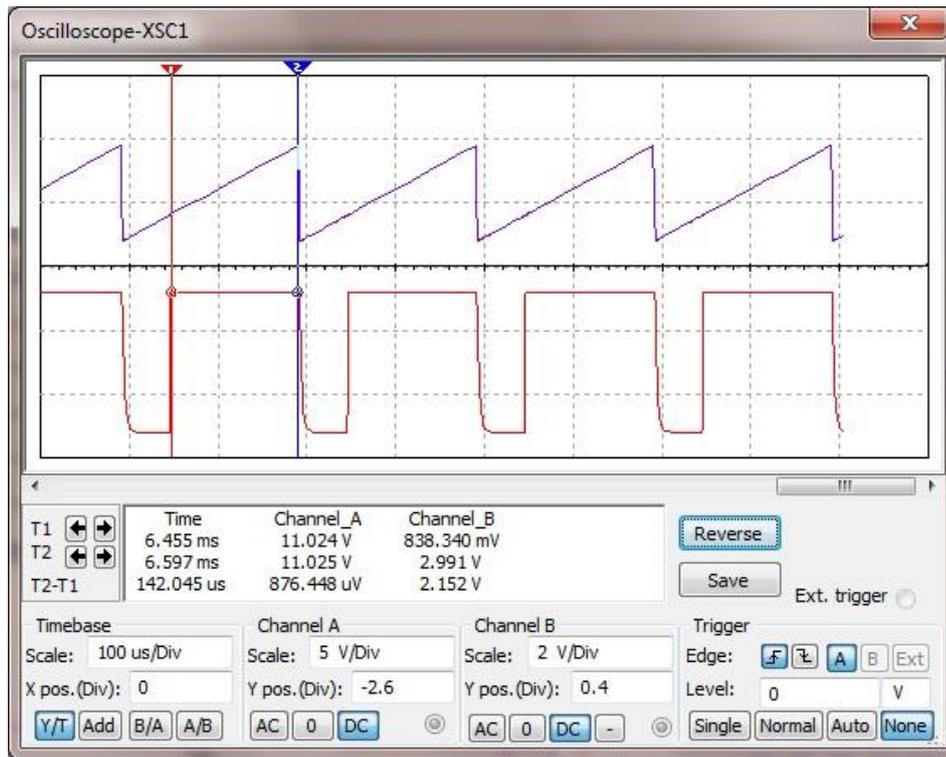


Fig. 4.11: Simulação do PWM para velocidade de 0,73 m/s.

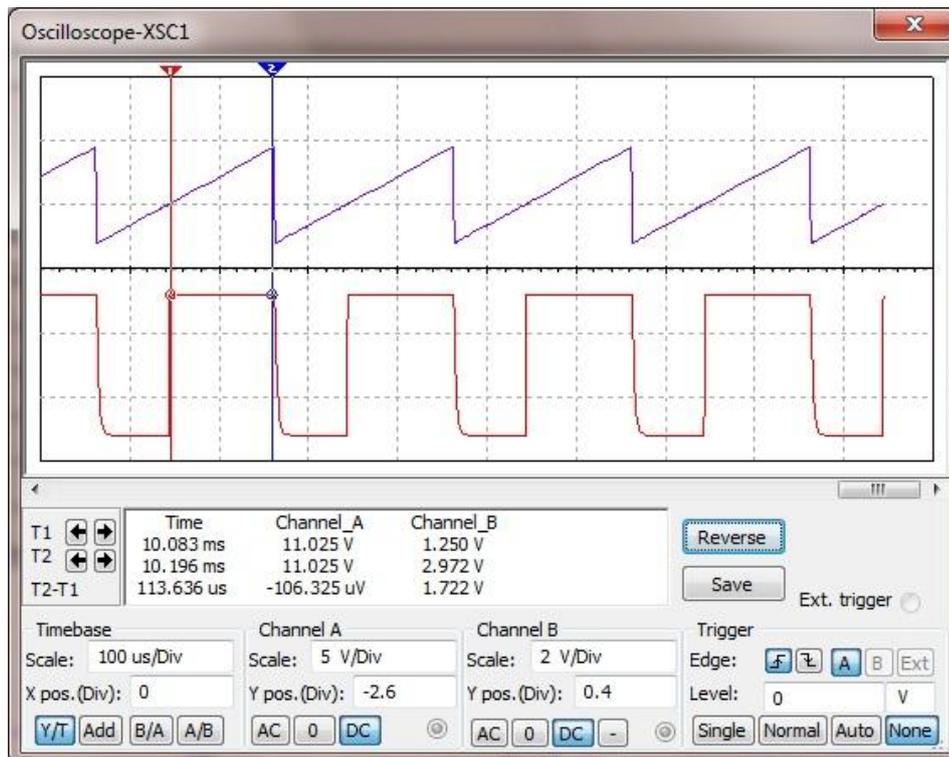


Fig. 4.12: Simulação do PWM para velocidade de 0,53 m/s.

Pode-se observar a diferença na largura do pulso nas figuras 4.11 e 4.12. As linhas verticais são os cursores 1 e 2 que medem as tensões e tempos, valores estes que podem ser vistos nas mesmas figuras. No canal A do osciloscópio está o PWM e no canal B está o dente de serra. Na figura 4.11 observa-se que o cursor 1 está no ponto onde o PWM passa para nível alto, isto ocorre quando a dente de serra, somada a 0,7V, atinge a tensão do pino 3 de U1 ou U2 (figura 4.10). O mesmo vale para a figura 4.12.

A tabela 4.3 mostra os tempos, o *duty cycle* e a tensão média no motor para aplicações em grama alta ou baixa. O *duty cycle* é a fração de tempo do nível alto do PWM em relação ao período do sinal.

Tabela 4.3 – Tensão média nos motores para diferentes aplicações.

| Grama | Velocidade | Tempo Alto | Tempo Baixo | Duty Cycle | $V_{média}$ motor |
|-------|------------|-----------------|----------------|------------|-------------------|
| Baixa | 0,73 m/s | 142,045 μ s | 57,955 μ s | 71 % | 8,52V |
| Alta | 0,53 m/s | 113,636 μ s | 86,364 μ s | 56,8 % | 6,82V |

Na figura 4.13 observa-se a foto do circuito PWM.



Fig. 4.13: Foto do circuito PWM.

Na foto 4.13 notam-se os mosfets e diodos montados nos dissipadores de calor. Os circuitos integrados TL494 podem ser vistos mais ao centro.

4.4 Descrição da montagem mecânica

O desenvolvimento da parte mecânica demandou muito tempo e esforço, tendo exigido a realização de diversos protótipos até se chegar a uma estrutura robusta e confiável.

A figura 4.14 ilustra a primeira tentativa de acoplamento do motor.



Fig. 4.14: Primeira tentativa de acoplamento do motor.

Neste primeiro protótipo foram utilizadas pinhas e correntes de bicicletas para o acoplamento do motor CC a roda. Esta primeira idéia de montagem não apresentou bom desempenho e foi descartada. Um dos problemas desta montagem era que qualquer desalinhamento das pinhas causava a queda da corrente e como fixação destas pinhas não era precisa as quedas de corrente aconteciam com frequência. Outro problema era que o cortador

de grama, apesar de se mover com facilidade em terreno plano, não tinha torque suficiente para vencer terrenos mais irregulares.

A aquisição de outro tipo de motor cc, visto na figura 4.15, com redução suficiente para acoplamento direto nas rodas, resolveu ambos os problemas relatados anteriormente. Na figura 4.15 observa-se o eixo na caixa de redução do lado esquerdo. Uma alavanca pode ser manipulada para desconectar o eixo da redução no caso de ser necessário girar o eixo livremente. Ainda na mesma figura podem-se notar os quatro fios, dois de maior diâmetro para a alimentação do motor e dois de menor diâmetro para o acionamento do freio magnético.



Fig. 4.15: Motor utilizado no projeto

Após a aquisição dos dois motores foi necessário fixar as rodas traseiras do cortador de grama nos motores e depois fixar os dois conjuntos motor-roda ao chassi do cortador.

O acoplamento das rodas aos eixos dos motores exigiu a confecção de peças em tornearia mecânica. As peças foram feitas pensando-se em: ajustar o diâmetro externo do eixo do motor ao diâmetro interno da roda, evitar que a roda gire em falso e evitar o

desprendimento da roda do eixo. O problema da diferença de diâmetro entre o eixo e a roda foi resolvido com o preenchimento da folga pela peça confeccionada, o problema da roda girar em falso sobre o eixo foi resolvido com a utilização de chavetas enquanto que o problema da possibilidade de desprendimento de roda do eixo foi resolvido com fixação por porca. A figura 4.16 mostra a peça já fixada na roda e no eixo do motor. Cinco parafusos transpassam a roda fixando as partes interna e externa da peça confeccionada. A função destes parafusos é evitar o giro em falso entre a peça confeccionada e a roda, como a roda é de material plástico a solução deste problema com a fixação por meio de chavetas não foi considerada.



Fig. 4.16: Fixação da roda ao eixo do motor

Estando fixadas as rodas aos eixos dos motores o próximo passo foi a fixação dos motores ao chassi do cortador de grama. Duas chapas metálicas em L foram construídas, cada chapa é fixada na parte de baixo do motor e no suporte lateral do chassi do cortador de grama. A figura 4.17 mostra a fixação do motor ao chassi.



Fig. 4.17: Fixação do motor ao chassi

As rodas dianteiras do cortador original foram substituídas por duas rodas do tipo rodízio para que a máquina pudesse girar conforme solicitação das rodas traseiras. O giro da máquina para a direita, por exemplo, é feito com o acionamento da roda esquerda para frente enquanto a roda direita é acionada para trás, cabendo as rodas dianteiras apenas acompanhar o movimento. A fixação das novas rodas exigiu a construção de um suporte metálico conforme visto na figura 4.18.



Fig. 4.18: Suporte metálico das rodas dianteiras.

A visão geral da parte mecânica é apresentada na figura 4.19.



Figura 4.19: Visão geral da mecânica.

5. RESULTADOS ALCANÇADOS

Os testes práticos mostraram que a máquina possui força suficiente para enfrentar terrenos acidentados, movimentando-se com facilidade mesmo com o atrito da grama sob a mesma. Pequenos desvios na direção da máquina podem ocorrer devido às imperfeições do terreno, porém não comprometem a utilização visto que a aplicação não requer grande precisão em seu direcionamento.

Uma preocupação no início deste projeto era de que a máquina poderia tracionar mais para um lado fazendo com que ela não seguisse uma trajetória em linha reta. Antes da implementação do circuito PWM a máquina não apresentava desvios na sua trajetória, porém após a inclusão do circuito PWM a máquina passou a apresentar um pequeno desvio para o lado direito. O trimpot multivoltas P1 em U1, visto na figura 4.10, foi utilizado para ajuste fino. O teste de rotação das rodas foi executado primeiramente com as rodas girando livremente, através de um apoio que foi colocado embaixo da máquina mantendo as rodas no ar. Duas marcações foram feitas com fita nas rodas para a observação do alinhamento das mesmas. Com o acionamento dos motores observou-se a diferença no alinhamento das fitas a cada volta. Ajustou-se então o trimpot multivoltas até que as fitas mantivessem o alinhamento após dez voltas das rodas. Após este ajuste a máquina foi testada acionando-se para frente por 25 m e após retornando de ré até o ponto inicial. Um desvio de 20 cm foi observado no retorno da máquina ao seu ponto de partida, porém desvio este aceitável para a aplicação a que se destina a máquina. Após o ajuste de P1, as tensões medidas no pino 3 de U1, para as diferentes velocidades, são de 1,91V e de 1,5V enquanto que as tensões medidas no pino 3 de U2 são de 1,97V e de 1,57V.

Outro teste prático foi executado para verificar o aquecimento dos mosfets responsáveis pelo chaveamento da potência entregue aos motores. A medição de temperatura dos mosfets, feita após uma hora de utilização, indicou uma temperatura de 45 °C,

aquecimento este considerado normal considerando-se o fato da utilização de dissipadores de calor nestes mosfets. Grande parte do aquecimento dos mosfets é devido ao R_{dson} e ao tempo de descida do PWM, medido em $2,9\mu s$, figura 5.1.

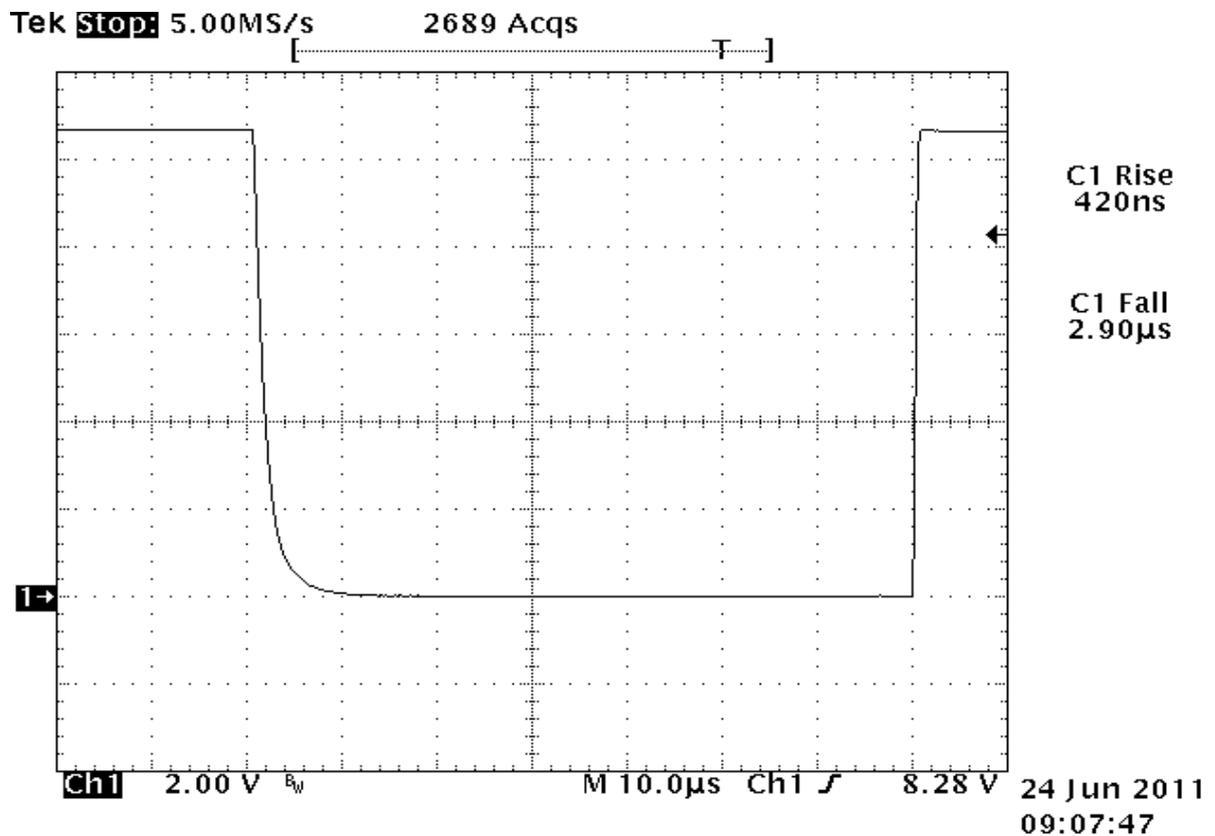


Fig. 5.1: Tempos de descida e subida do PWM.

A corrente de cada motor foi medida em 1,65A com as rodas girando livres e de 3,55A em terreno plano e regular. A corrente de cada bobina do freio magnético é medida em 426mA, a corrente dos circuitos PWM e receptor é de 96mA enquanto que a corrente de todos relés acionados ao mesmo tempo é de 420mA. A corrente total do sistema, para o pior caso, é de 8,468A e neste caso a autonomia da bateria é de 4 horas e 43 minutos.

A comprovação do funcionamento do circuito PWM pode ser vista nas figuras 5.2 e 5.3, para as velocidades 0,73m/s e 0,53m/s respectivamente. Ambas as figuras são

semelhantes às simulações mostradas nas figuras 4.11 e 4.12, feitas para a análise do circuito PWM na seção 4.3.

Na figura 5.2 a tensão do sinal dente de serra do oscilador é vista na parte superior. Esta tensão foi obtida no pino 5 de U2, figura 4.10. O sinal dente de serra é cortado pela tensão contínua de 1,576V, medida indicada na figura 5.2, no canal 3 do osciloscópio. Esta tensão contínua foi obtida no pino 3 de U2, figura 4.10, e é a referência para a da largura de pulso do PWM. O sinal PWM é visto na parte inferior da figura e foi obtido no ponto P2A do circuito PWM, figura 4.10. Observa-se que o PWM passa para nível alto quando a tensão contínua corta a subida do dente de serra e retorna para nível baixo quando a tensão contínua corta a descida do dente de serra.

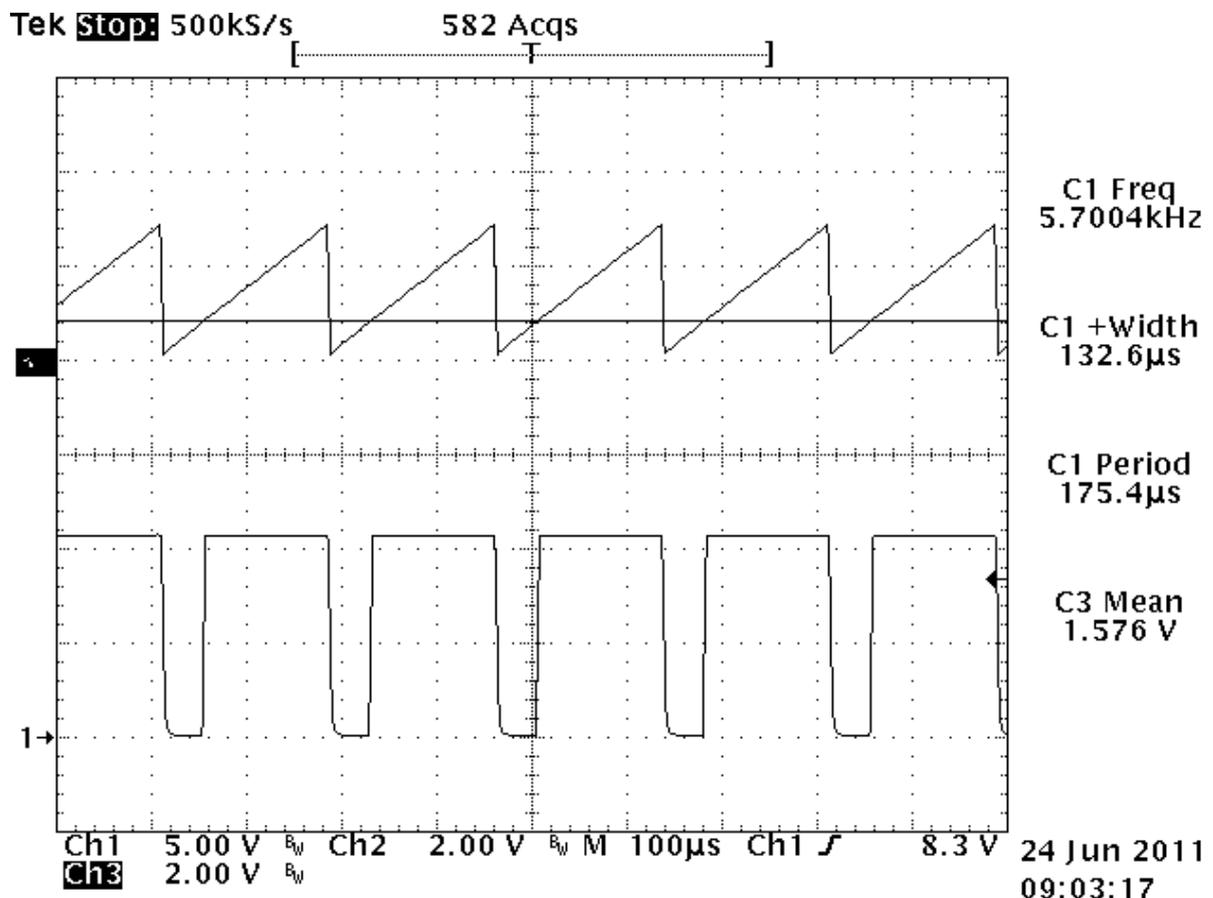


Fig 5.2: Tensões no circuito PWM para velocidade 0,73m/s.

A figura 5.3 tem as mesmas características explicadas para a figura 5.2, porém a tensão contínua de referência é de 1,972V e conseqüentemente a largura do pulso alto do PWM é menor. A tensão contínua é alterada pela chave SW1 da figura 4.10.

As figuras indicam também o tempo de pulso alto de 132,6 μ s e 107 μ s, tempos estes muito próximos dos obtidos nas simulações. A frequência do PWM, que foi calculada e simulada para 5kHz, ficou em 5,7kHz. A tolerância dos componentes C3, R3, U1 e U2 são responsáveis por esta diferença de 14%, bem como a conexão de U2 como slave de U1.

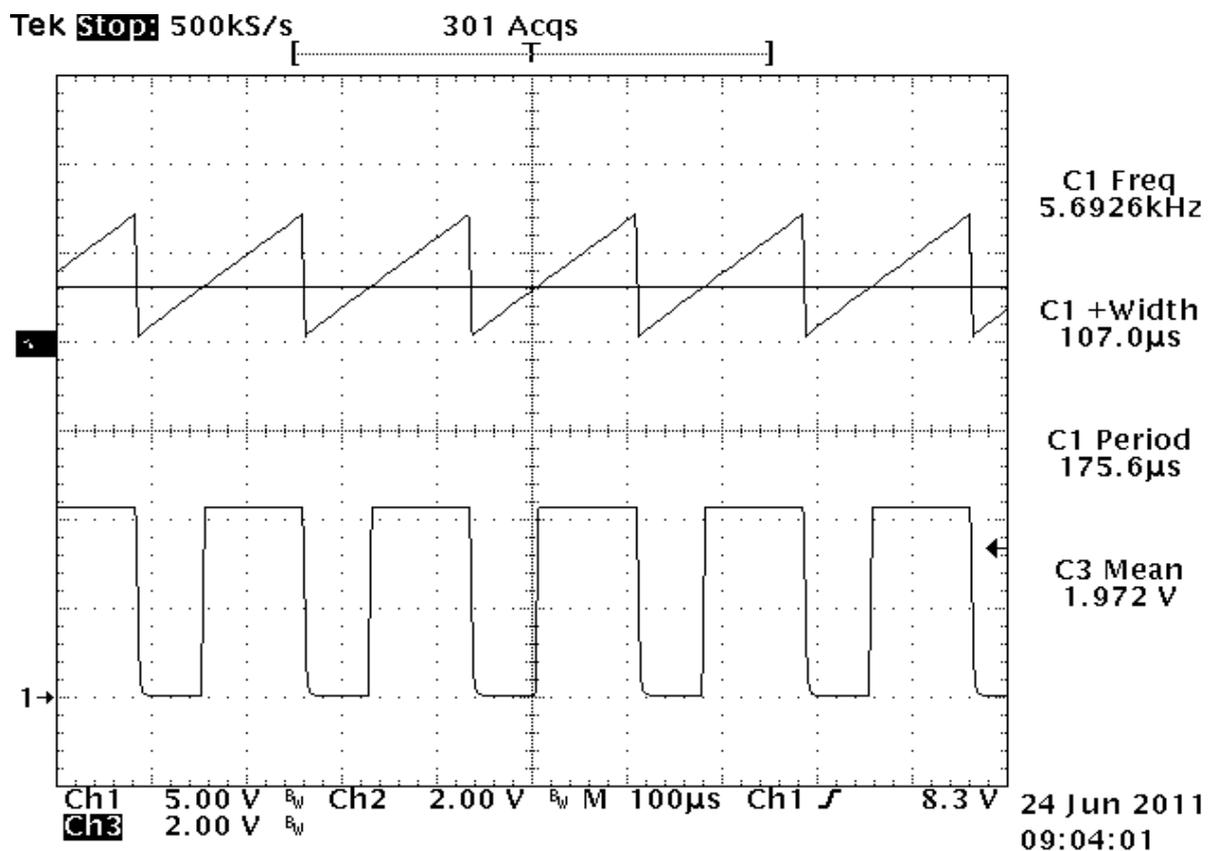


Fig. 5.3: Tensões no circuito PWM para velocidade 0,53m/s.

Todos os ensaios foram realizados com a utilização do controle remoto, de forma a confirmar o seu correto funcionamento. O alcance do controle remoto foi medido em 60 metros em campo aberto. A codificação e decodificação feita pelos CIs U1 e U5, figuras 4.2 e

4.3, possibilitou transmissões sem erros ou atrasos nos comandos, tornando a movimentação do cortador de grama eficaz.

A confirmação do funcionamento da comunicação entre o circuito transmissor e o circuito receptor pode ser vista nas figuras 5.4 e 5.5.

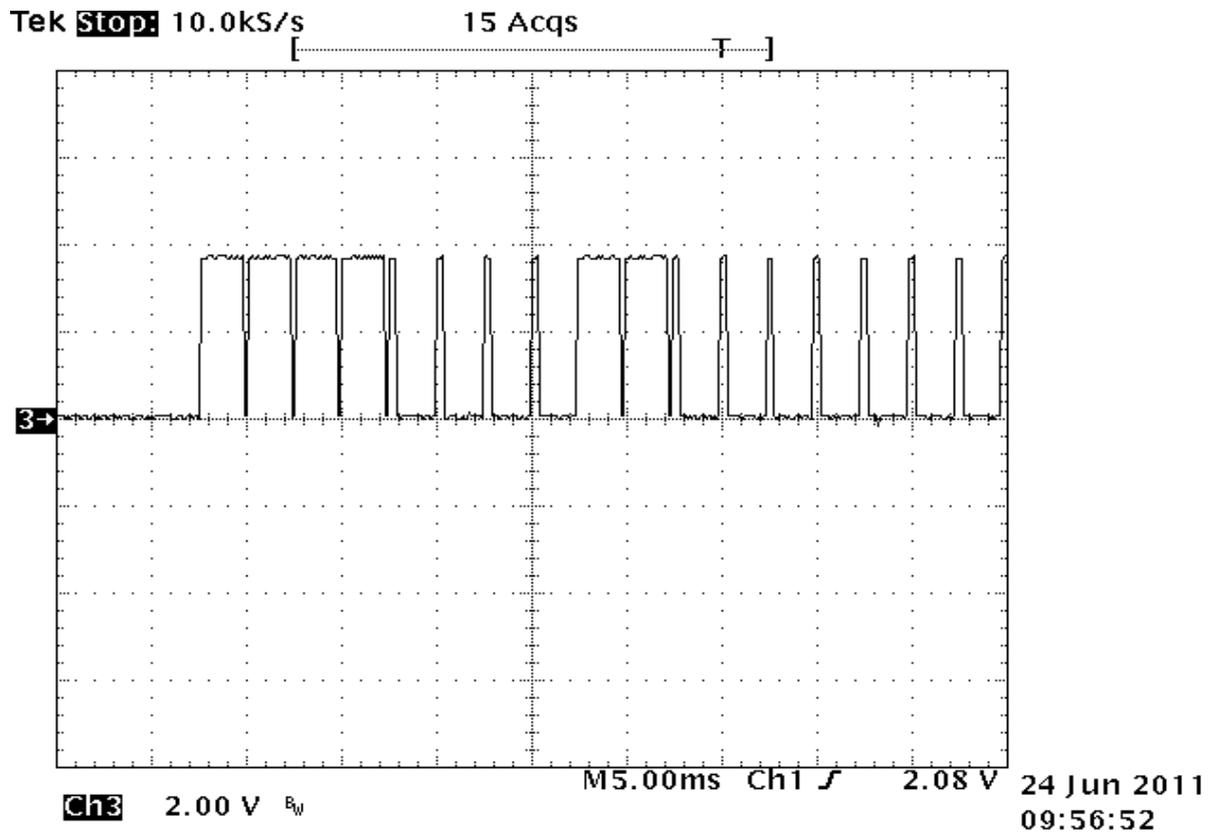


Fig. 5.4: Recepção de dados com botões soltos.

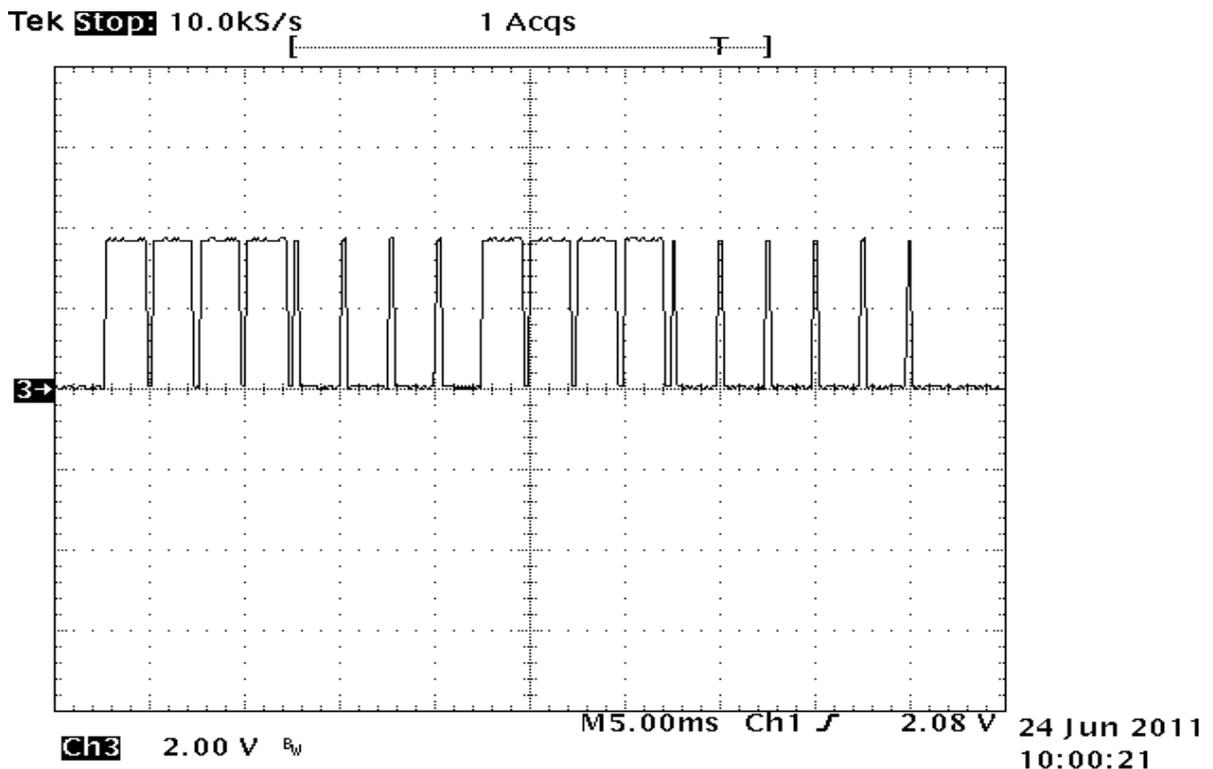


Fig. 5.5: Recepção de dados com botão Frente pressionado.

Ambas as figuras foram obtidas com a conexão do osciloscópio no pino 14 de U3 no circuito receptor, visto na figura 4.3.

Os primeiros cinco pares de pulsos correspondem aos endereços enquanto os quatro pares de pulsos seguintes representam os dados recebidos. Um par de pulsos longos representa nível alto enquanto que um par de pulsos estreitos representa nível baixo. Na figura 5.4 observa-se que todos os dados estão em nível baixo já que os pinos 6, 7, 9 e 10 de U1 (figura 4.2) estão em nível baixo enquanto que na figura 5.5 o primeiro dado (sexto par de pulsos) está em nível alto devido a atuação sobre o botão Frente.

6. CONCLUSÃO

O cortador de grama funcionou perfeitamente nos testes práticos, enfrentado terrenos diversos e pequenos aclives. O controle remoto, mesmo sendo do tipo liga-desliga, propiciou bom controle e bom alcance. As duas velocidades ajustadas pelo circuito PWM também se mostraram adequadas para a utilização prática.

A execução da parte mecânica neste projeto demandou muito tempo devido as dificuldades de acoplamentos das rodas aos motores e destes ao chassi da máquina o que faz rever as alternativas iniciais. A alternativa de se construir um chassi de ferro ou alumínio ao invés de utilizar um chassi pronto poderia facilitar o acoplamento dos motores e das rodas dianteiras.

Este projeto abre ainda diversas possibilidades de melhorias futuras, como o controle de posição por GPS, por exemplo. O controle via internet também pode ser implementado utilizando-se um webserver baseado em microcontrolador com interface sem fio, assim o cortador de grama pode ser controlado através de computadores, celulares ou quaisquer outros dispositivos com acesso a internet sem fio. As sugestões de melhorias mencionadas podem tornar a máquina autônoma já que uma área pode ser delimitada para o funcionamento da mesma e seu controle pode ser executado a partir das coordenadas do GPS.

Sensores de ultrassom podem ser implementados para identificar obstáculos de forma a frear a máquina ou mesmo executar desvios em sua trajetória. Estes sensores poderiam ser desligados no caso de utilização de máquina em grama muito alta. Outra sugestão, alternativa a utilização de GPS, seria a utilização de um sensor magnético tipo bússola com compensação de inclinação, de forma a manter a trajetória em linha reta e executar manobras com precisão.

A máquina de corte de grama cumpriu seu objetivo principal de eliminar o esforço do operador ao deslocar a máquina pelo terreno. A boa robustez da parte mecânica e eletrônica

possibilita a utilização da máquina de corte de grama em sua função real e não apenas como um protótipo.

7. REFERÊNCIAS

- [1] TC TELECONTROLLI, **RR3-XXX**, Super Regenerative Radio Receiver With Laser Trimmed Inductor.
- [2] TC TELECONTROLLI, **RT4-XXX**, Radio Transmitter Module with SAW Resonator and External Antenna.
- [3] MOTOROLA SEMICONDUCTOR TECHNICAL DATA, **MC145026**, **MC145027**, **MC145028**, Encoder and Decoder Pairs Cmos.
- [4] HE LI SHUN, **HLS-T90(15F)**, Datasheet.
- [5] ON SEMICONDUCTOR, **TL494**, **NVC494**, Switchmode Pulse Width Modulation Control Circuit.
- [6] ON SEMICINDUCTOR, **AN983/D**, A Simplified Power Supply Design Using the TL494 Control Circuit.
- [7] TEXAS INSTRUMENTS, **SLVA001D**, Designing Switching Voltage Regulators with the TL494.
- [8] INTERNATIONAL RECTIFIER, **IRFZ48N**, Hexfet Power Mosfet.
- [9] PHILIPS SEMICONDUCTORS, **MOTOR CONTROL**, Power Semiconductor Applications.