

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
CURSO SUPERIOR DE TECNOLOGIA EM MANUTENÇÃO INDUSTRIAL

FABIO TOSHIO YAMAMOTO

CONTROLADOR DE DIREÇÃO AUTOMÁTICA PARA TRATORES AGRÍCOLAS

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

MEDIANEIRA

2017

FABIO TOSHIO YAMAMOTO

CONTROLADOR DE DIREÇÃO AUTOMÁTICA PARA TRATORES AGRÍCOLAS

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado como requisito para a obtenção do título de Tecnólogo do curso de Tecnologia em Manutenção Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Me. Alex Lemes Guedes

Coorientador: Me. Ivan Werncke

MEDIANEIRA

2017



Ministério da Educação
Universidade Tecnológica Federal do Paraná
Campus Medianeira
Diretoria de Graduação e Educação Profissional
Curso Superior de Tecnologia de Manutenção
Industrial



TERMO DE APROVAÇÃO

CONTROLADOR DE DIREÇÃO AUTOMÁTICA PARA TRATORES AGRÍCOLAS

FABIO TOSHIO YAMAMOTO

Este Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) foi apresentado às 19h30 do dia 27 de Novembro de 2017, como requisito parcial para a obtenção do título de Tecnólogo no Curso Superior de Tecnologia em Manutenção Industrial, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Medianeira. Os acadêmicos foram arguidos pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho Aprovado.

Prof. Msc. Alex Lemes Guedes
UTFPR – Câmpus Medianeira
(Orientador)

Prof. Msc. Ivan Wernecke
UTFPR – Câmpus Medianeira
(Coorientador)

Prof. Dr. Marcos Fischborn
UTFPR – Câmpus Medianeira
(Convidado)

Prof. Dr Diogo Marujo
UTFPR – Câmpus Medianeira
(Convidado)

A cópia assinada se encontra na coordenação do curso

RESUMO

YAMAMOTO, Fabio Toshio. Controlador de Direção para Tratores Agrícolas. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Tecnologia em Manutenção Industrial) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. MEDIANEIRA, 2017.

Este trabalho apresenta uma plataforma de hardware e software para implementação de um sistema de direção automática para tratores através de dados do sistema global de posicionamento (GPS). No mercado atual já existem sistemas com essa função, porém o custo ainda é elevado, o que os tornam inacessíveis à maioria dos produtores rurais. Este projeto buscou elaborar um produto acessível que auxilie em várias atividades do cultivo agrícola, como plantio e colheita, aproveitando o GPS já instalado no trator e usando componentes de baixo custo. Os testes efetuados em trajetos retilíneos mostraram que o sistema de controle se mostrou adequado, sendo funcional para terrenos planos e pouco acidentados. Mesmo com o trator não alinhado com a rota no início da operação, em pouco tempo o sistema se estabiliza e se mantém dentro do trajeto configurado. Para terrenos com maiores variações, como as curvas de nível, e para trajetos não retilíneos a resposta do sistema se mostrou ineficaz, evidenciando ainda a necessidade de melhorias.

Palavras-chave: Direção Automática. Piloto Automático. Automação Rural. Automação Máquinas Agrícolas.

ABSTRACT

This paper presents a hardware and software platform used to implement an automatic steering system for tractors. In the current market there are several systems with this function, but the cost is still high, which makes them inaccessible to many rural producers. This project seeks to elaborate an affordable product that could assist in several activities of the agricultural crop, like planting and harvesting, taking advantage of the GPS already installed on the machines and using low-cost components. The tests performed in rectilinear paths showed that the control system proved to be adequate, being functional for flat terrain and slightly uneven. Even with the tractor not aligned with the route at the beginning of the operation, in a short period the system stabilizes and remains within the configured route. For terrains with greater variations, such as contour plowing, and for non-rectilinear paths, the system response proved to be ineffective, evidencing the need for further improvements.

Key words: power steering, automatic pilot, rural automation, automation of agricultural machinery.

LISTA DE SIGLAS

CORS	Estações de Referência de Operação Contínua
LDR	Light Dependent Resistor
IGS	Serviço GNSS Internacional
GPS	Global Position System
NDGPS	Sistema Diferencial Nacional do GPS
PID	Proporcional, Integral e Derivativo
SIG	Sistemas de Informação Geográfico
WASS	Sistema de Ampliação Área

Sumário

1	INTRODUÇÃO.....	1
2	OBJETIVOS.....	3
3	REFERÊNCIAS	4
3.1	O SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL.....	4
3.2	TRABALHOS SIMILARES	5
3.3	SISTEMA DE CONTROLE.....	8
4	APRESENTAÇÃO DO PROJETO	10
4.1	APARELHO GPS	10
4.3	CONTROLADOR	12
4.4	MOTOR.....	13
4.5	CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE.....	14
4.5.1	Primeira proposta de controle.....	14
4.5.2	Segunda proposta de controle.....	15
4.6	COMUNICAÇÃO	21
5	RESULTADOS	22
5.1	MONTAGEM FÍSICA.....	23
5.1.1	Versão um.....	23
5.1.2	Versão 2	25
5.1.3	Versão 3	26
5.2	RESULTADOS PRÁTICOS.....	28
5.3	ESTUDOS DE CASOS.....	34
6	CONCLUSÃO.....	36
	REFERÊNCIAS.....	38

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Veículo desenvolvido, com seus sistemas sensoriais	6
Figura 2 – Vista terrestre do local dos testes	7
Figura 3 – Automóvel Chevrolet Astra.....	8
Figura 4 – Diagrama de blocos do sistema	10
Figura 5 – Equipamento DGPS utilizado.....	11
Figura 6 – Arduino Nano ATmega328.....	12
Figura 7 – MSP430 Launchpad.....	13
Figura 8 – Diagrama do driver de acionamento do motor de passo.....	14
Figura 9 – Diagrama de blocos da primeira técnica de controle proposta.....	15
Figura 10 – Diagrama de blocos do sistema de controle proposto.....	16
Figura 11 – Fluxograma do cálculo do controle PID utilizado	19
Figura 12 – Exemplo de atuação do proporcional, integral e derivativo	20
Figura 13 – Trator New roland, Modelo Tl85, ano 2014	22
Figura 14 – Circuito de aquisição de Dados Montado com LDR.....	23
Figura 15 – Detalhes da primeira montagem	24
Figura 16 – Volante e sistema de transmissão.....	24
Figura 17 – Circuito montado com Foto diodos.....	25
Figura 18 – Circuito completo do controlador de direção da montagem 2.	26
Figura 19 – Placa de controle com MSP430G2553	27
Figura 20 – Placa de driver da montagem 3.....	27
Figura 21 – Montagem final das placas.....	28
Figura 22 – Adaptação do sistema ao trator para coleta dos dados.	28
Figura 23 – Gráfico do erro de rota	29
Figura 24 – Quantidade de passos devido à ação proporcional.....	30
Figura 25 – Quantidade de passos devido à ação integral	31
Figura 26 – Quantidade de passos devido à ação derivativa.....	31
Figura 27 – Quantidade de passos efetivamente enviada ao motor para atuação no volante a cada período de amostragem	32
Figura 28 – Posição do volante.....	32

Figura 29 – Posição do trator em latitude e longitude	33
Figura 30 – Rastro do trator na estada de calçamento poliédrico (a) e em uma plantação de soja (b).	35

1 INTRODUÇÃO

Através da observação dos trabalhos realizados no campo operações como plantio, colheita, aplicações de fertilizantes e defensivos agrícolas exigem períodos longos de trabalho para sua execução. Esse tipo de trabalho se torna, portanto, bastante cansativo e estressante, o que pode levar a acidentes. As principais causas de acidentes com tratores são o cansaço gerando 26,31% e a falta de atenção causa de 24,51% dos acidentes, falhas humanas no geral são responsáveis por até 91% dos acidentes (FERNANDES, et al, 2013).

Novas tecnologias como a direção assistida por controladores e Sistema de Posicionamento Global (GPS - Global Position System) tendem a reduzir os erros de operação buscando aumentar o rendimento das áreas agrícolas (Senar, 2012). O uso da direção assistida possibilita melhorias no serviço de máquinas automotoras da área agrícola, aumentando a segurança dos operadores, a precisão e a eficiência de várias operações como a preparação do solo, adubação, plantio, pulverização e colheita (Senar, 2012). Um exemplo é a redução do desperdício de material ou área de plantio, ao evitar falhas ou sobreposições nas operações.

A Revista Plantio Direto - Edição 137, em uma pesquisa envolvendo vários países da Europa, apontou que em diversas culturas (beterraba, batata, trigo e cevada) as principais vantagens da pilotagem automatizada foram o aumento da produtividade e economia de energia requerida nas operações agrícolas (preparo do solo, semeadura, colheita e transporte). O aumento de produtividade variou entre 4 a 20% e a economia energética variou de 37 a 70% (CHAMEN et al., 1992).

Em relação à distância percorrida pelas máquinas dentro da lavoura, Bochtis et al, (2010) reportaram uma redução na distância de transporte variando de 25 a 47%, quando utilizado pilotagem automatizada, gerando um incremento na eficiência das operações de 4,68 a 7,41 %. Esta redução decorre da minimização das manobras nas extremidades da lavoura e do melhor planejamento das linhas de tráfego dentro da área.

O Sistema de pilotagem automática é um facilitador nas tarefas rurais, pois trabalhos como plantio, colheita e aplicações de defensivos agrícolas se estendem por horas, e até mesmo dias, exigindo total atenção do operador do trator durante as manobras. A pilotagem automática se encontra em processo de consolidação no Brasil, com custos ainda muito elevados. As diversas marcas ofertadas no comercialmente são, na maioria, de tecnologia estrangeira, com alto custo de importação e desenvolvimentos incluídos, o que torna o produto pouco acessível ao pequeno e médio produtor.

O trabalho apresentado neste documento se iniciou em 2015 no formato de inovação tecnológica da UFTPR. Neste trabalho é apresentada uma proposta mais acessível para direção automática de tratores agrícola, utilizando o dispositivo GPS normalmente já encontrado nas máquinas. O sistema é composto por duas partes: a parte física (*hardware*) e a parte de *software*. O primeiro trata a parte física necessária para girar o volante, como conexões mecânicas, posicionamento do motor, sistema de tração do volante e placas eletrônicas para controle. O segundo determina o funcionamento do sistema, sendo personalizado em um programa capaz de substituir parcialmente o operador de máquina.

Nesta primeira parte foi apresentada uma breve contextualização do projeto. O capítulo 2 contém os objetivos gerais e específicos; no capítulo 3 serão apresentados conceitos importantes para o entendimento do projeto; no capítulo 4 será apresentado o projeto em detalhes, seguido dos resultados obtidos. Por fim, no capítulo 6, as conclusões.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de um controlador de direção automática para Tratores Agrícola. Para isso será necessária a construção física (*hardware*) contendo um motor para girar o volante, o sistema de acoplamento que permita a tração do volante pelo motor ou pelo motorista do trator e ainda o sistema eletrônico de verificação de erro de rota e de controle de direção. Faz parte dos objetivos, ainda, o estudo e implementação de uma metodologia de controle para permitir o correto comando do volante frente a um erro de rota. Entre os objetivos específicos, pode-se citar:

- Definição de um microcontrolador para controle do sistema;
- Aprendizagem de linguagem de programação C;
- Projetar e montar um circuito eletrônico para controle do motor e para processar as informações enviadas pelo GPS;
- Estudar e implementar uma metodologia de controle em linguagem C;
- Construir um sistema de acoplamento de um motor ao volante do trator, com sistemas de tração que permita que o operador tome controle em casos de perigo iminente;
- Testar o controlador de direção em laboratório e na prática em uma área rural com o trator;
- Analisar os resultados obtidos, percepções e conclusões.

3 REFERÊNCIAS

Nas sessões a seguir são apresentados alguns conceitos fundamentais utilizados no projeto.

3.1 O SISTEMA DE POSICIONAMENTO GLOBAL

O Sistema de Posicionamento Global (GPS - Global Positioning System) é um serviço criado e mantido pelos Estados Unidos da América com o objetivo de fornecer serviços de localização, navegação e sincronização no mundo todo. A parte física desse sistema é composta por uma constelação de 24 satélites mais 4, que orbitam ao redor da terra a uma altitude de 20.200km. Estes são distribuídos em 6 camadas orbitais com 4 unidades cada (HURN, 1989), em uma configuração que garante, no mínimo, que quatro satélites GPS sejam visíveis em qualquer lugar da superfície terrestre ou acima dela a qualquer hora do dia ou da noite, o que permite à uma estação receptora na superfície da terra calcular localmente sua posição.

A utilização do sistema é dividida em civil e militar, sendo que para uso civil existe restrição quanto à precisão. Entre as utilizações comuns do GPS no meio civil pode-se citar a navegação nos meios de transporte, verificação do posicionamento para sistemas de roteamento, levantamentos topográficos, estudos geodésicos, agricultura de precisão, entre outros. Devido à limitação de precisão adicionada intencionalmente na utilização civil do GPS, muitos sistemas de reforço foram desenvolvidos por setores públicos e privados.

Entre os sistemas de reforço ou correção do sinal GPS existe o GPS diferencial (DGPS). Este sistema foi iniciado nos EUA em 1996 e foi nomeado como Sistema Diferencial Nacional de GPS (NDGPS). O sistema se baseia em estações fixas na superfície, com localização precisa e conhecida. Essas estações calculam uma correção diferencial entre sua posição e a predita pelo satélite e a transmite, permitindo que estações DGPS ao seu alcance corrijam sua posição com o mesmo fator. A precisão chega a algumas dezenas de centímetros. O NDGPS foi construído para os

padrões internacionais, de forma que sistemas semelhantes foram implementados por 50 países ao redor do mundo (GPSRORG, 2017).

O uso do GPS gerou um grande impacto na agricultura ao tornar conhecido a posição exata onde máquinas agrícolas e equipamentos estão, ajudando em questões como planejamento de plantio, mapeamento de campo, amostragem de solo, direcionamento de veículos, inspeção da colheita, tempos variáveis de aplicação e mapeamento da produção. Essa tecnologia é uma das principais ferramentas da chamada agricultura de precisão, que consiste em trabalhar as culturas para que se possa usar o espaço disponível da melhor forma possível com auxílio tecnológico. O sistema GPS ainda permite o trabalho do agricultor mesmo em condições adversas, como em baixa visibilidade do campo em função da chuva, poeira, névoa ou escuridão (GRECO et al, 2011).

3.2 TRABALHOS SIMILARES

No contexto de direção automática de veículos automotores existem diversos trabalhos na literatura. O trabalho apresentado por Hernandez et.al.(2012), por exemplo, apresenta uma proposta de um veículo em escala reduzida, mostrado na Figura 1, com a adaptação de um controle de direção para o seguimento de trajetórias. O chassi foi fabricado pela empresa Tamiya, (2010), de modo que o veículo possui 42 cm de comprimento, 18 cm de largura, tração diferencial nas quatro rodas por um motor de corrente contínua e direcionamento pela orientação das duas rodas dianteiras atuado por um servo motor.

Mediante aos resultados conseguidos no desenvolvimento dos testes, observou-se que o veículo não pôde seguir uma trajetória predefinida devido ao erro do GPS. Como conclusão, o trabalho apresentou o desenvolvimento de um veículo terrestre em escala com a capacidade de navegar automaticamente até um ponto com coordenadas conhecidas. Com isso o objetivo foi atingido por meio das alterações no veículo em escala, onde foram adaptadas tecnologias de automação, tendo a capacidade da

supervisão e monitoramento de uma plataforma remota.

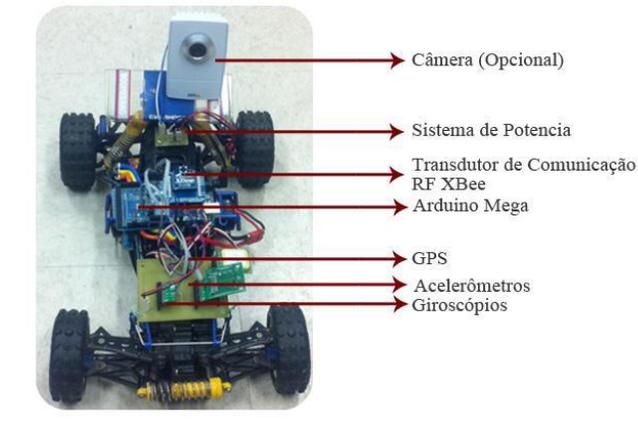


Figura 1 – Veículo desenvolvido, com seus sistemas sensoriais
 Fonte: Hernandez, Vitor, Ferreira, Meirelles (2012)

Outro trabalho que apresenta sistemas de navegação automática é o desenvolvido por Gabriel (2014), intitulado “Desenvolvimento de sistema de Navegação de baixo custo de um veículo terrestre não tripulado”. O foco principal era o desenvolvimento de sistemas de navegação autônoma e assistida para veículos terrestres, utilizando a rede NTRIP para transmissão de correções via rede sem fio. Este trabalho visou contribuir de forma significativa com o desenvolvimento científico e tecnológico nacional, fazendo com que se tenha programas e *hardwares* de baixo custo disponível para esse tipo de posicionamento.

No trabalho apresentado neste capítulo foram utilizados os programas, Mission Planner 2.43, o X-CTU e o BKG NTRIP client. O veículo para a pesquisa científica do trabalho em questão trata-se do Duratrax Firehammer, mostrado a Figura 2, de escala 1/5 que utiliza uma mistura de gasolina podium e óleo de dois tempos. Este veículo é alimentado por um motor de 23 cc, com 71,5 x 42,0 x 26,5 cm, pneus cravados e comunicação via rádio de 433 MHz.

Os experimentos se iniciaram em terrenos irregulares e posteriormente se buscou regularidade de solo e visada direta ao céu. Os locais de experimento são mostrados sequencialmente na Figura 2.



Figura 2 – Vista terrestre do local dos testes
Fonte: GABRIEL (2014)

Como conclusão geral da pesquisa acima, tendo como objetivo geral a utilização da internet para realizar a transmissão de dados do DGPS, por meio de uma eletrônica de baixo custo, com um sistema totalmente controlado e com GPS, e comunicação sem fio via XBee para obtenção da correção dos dados obtidos, constatou-se que é possível fazer com que o automodelo realize uma trajetória pré definida com precisão. Através dessa metodologia empregada foi possível a obtenção da geração de correções DGPS através de observáveis conduzidas pela internet. É possível serem geradas pelo usuário ou por qualquer outro computador que esteja conectado à internet e serem retransmitidas através de enlaces de rádio.

Outro trabalho similar ao projeto deste trabalho é o de Vítor Brandão Sabbagh (2009), denominado “Desenvolvimento de um Sistema de Controle para um Veículo Autônomo”. Este estudo iniciou-se em 2007 e foi desenvolvido pelo Grupo de Pesquisa e Desenvolvimento de Veículos Autônomos da Universidade Federal de Minas Gerais o CADU (Carro Autônomo Desenvolvido na UFMG), que é um veículo autônomo com sua forma em um automóvel de passeio. O projeto consistia em prover ao mesmo a capacidade de percorrer determinadas trajetórias sem a presença de um condutor. Foi criado um *software* que une todos os sistemas de controle e de sensoriamento. Não obstante, foi desenvolvido um módulo que controla a posição e atitude do veículo. Para

a validação do sistema foi realizado um experimento onde o carro percorre um conjunto determinado de coordenadas geográficas sem nenhuma intervenção humana. O carro de passeio no qual este trabalho foi desenvolvido é um Chevrolet Astra Sedan 2.0 mostrado na Figura 3.



Figura 3 – Automóvel Chevrolet Astra
Fonte: Sabbagh (2009)

O veículo operou autonomamente, a partir do controle da orientação de suas rodas dianteiras. Resultados experimentais demonstraram a habilidade do veículo de seguir um caminho com extensão de 50m em uma área coberta por paralelepípedos e pedras com um erro médio de 0,59m. Em uma área coberta por terra e grama, o veículo seguiu de forma completamente autônoma um caminho de 240m de extensão com um erro médio de 0,51m.

3.3 SISTEMA DE CONTROLE

O controlador é um dispositivo capaz de determinar um ângulo de giro no volante a partir de informações como a rota desejada e a posição atual do veículo, ou, em outras palavras, o erro de posição em relação a uma rota preestabelecida. Neste contexto, a técnica de controle PID (Proporcional, Integral e Derivativo) é uma das modelagens mais utilizadas na indústria em todo o mundo para sistemas de controle industriais em malha fechada. Trata-se de uma modelagem robusta, que pode ser aplicada em diversos tipos de sistemas e pode ser operada de forma simples e direta. Este modelo permite calcular um valor de atuação sobre o processo a partir da

diferença entre o valor desejado e o valor atual do processo, ou seja, a partir do valor de erro.

A fórmula básica do PID é apresentada a seguir:

$$V(t) = K_p * E(t) + K_i * \int E(t)dt + K_d * \frac{dE(t)}{dt},$$

Onde, $E(t)$ é o valor do erro e K_p , K_i e K_d são constantes que devem ser configuradas de acordo com o processo (Bazanella, 2005).

4 APRESENTAÇÃO DO PROJETO

A Figura 4 mostra o diagrama de blocos do sistema proposto. Ele é inserido entre um aparelho de GPS comercial e o sistema de direção da máquina agrícola, substituindo parcialmente o motorista da máquina, que ficará responsável apenas por manter a velocidade em um valor entre 4 e 15 km/h (dependendo do tipo de operação), por configurar a rota a ser percorrida e por colocar a máquina numa posição próxima do desejado no momento inicial.

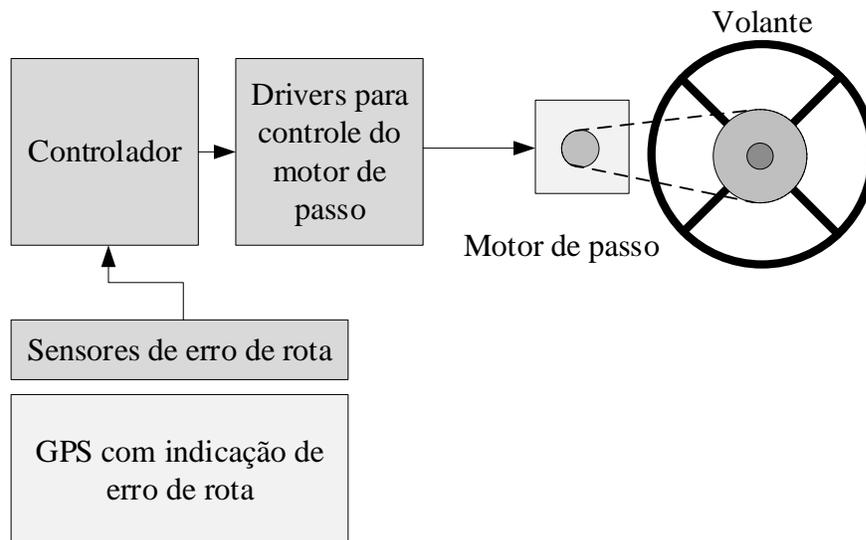


Figura 4 – Diagrama de blocos do sistema
Fonte: Fabio Toshio Yamamoto

Nas sessões a seguir serão detalhadas as partes constituintes do projeto.

4.1 APARELHO GPS

No sistema proposto, o bloco GPS é responsável por adquirir a posição real da máquina agrícola com uma precisão adequada, criar uma rota de acordo com a necessidade do operador e indicar a posição em relação à rota (erro) através de um sinal luminoso.

No desenvolvimento desse trabalho foi utilizado o equipamento modelo BP230, marca Teejet, mostrado na Figura 5(Teejet Technologies, 2009). Trata-se de um aparelho de DGPS e GPS comercial.



Figura 5 – Equipamento DGPS utilizado.
Fonte: Teejet Technologies

Este equipamento é capaz de criar rotas paralelas em formato de retas, curvas ou círculos, com precisão, linha após linha, de 0 a 50 cm. Após o cálculo da rota e com o veículo em movimento, se este se desviar uma distância determinada da rota planejada um LED é aceso na direção em que ocorreu o desvio. O equipamento possui cinco LEDs para cada direção de erro, que são acionados de forma linear.

O equipamento possui também uma saída serial RS232, de maneira que pode ser lido também as coordenadas reais que descrevem a posição da máquina através do protocolo NMEA. Esse recurso foi utilizado neste trabalho para comparar o desempenho do sistema proposto.

4.2 SENSORES DE ERRO DE ROTA

No sistema proposto, o bloco GPS é responsável por adquirir a posição real da máquina agrícola com uma precisão adequada, criar uma rota de acordo com a necessidade do operador e indicar a posição em relação à rota (erro) através de um sinal luminoso.

Os sensores de erro de rota, citados na Figura 4, foram implementados em duas versões: uma utilizando LDR (light dependent resistor) e outra utilizando fotodíodo. A disposição física desses sensores deve combinar com o modelo de GPS empregado, portanto, neste trabalho foram utilizados 10 sensores, um para cada LED do equipamento GPS, montados de modo que a luz emitida pelo LED incida diretamente sobre o sensor, e este apresente uma resposta binária: 0 e 1, sendo LED aceso e apagado, respectivamente.

4.3 CONTROLADOR

O controlador é o dispositivo físico que contém o programa de controle do sistema. O projeto foi iniciado utilizando como controlador a plataforma Arduino Nano que é baseado no microcontrolador ATmega328, mostrado na Figura 6.

A principal vantagem na utilização desta plataforma é a quantidade de bibliotecas, a velocidade com que é possível modelar as idéias e a facilidade de programação. O arduino nano já possui na sua placa tudo o que é necessário para seu funcionamento, como comunicação USB tanto para gravação do microcontrolador quando para comunicação serial, alimentação pelo conector USB, pinos de entrada/saída genéricos e demais periféricos normais de microcontrolador, como temporizadores, interrupções, etc.

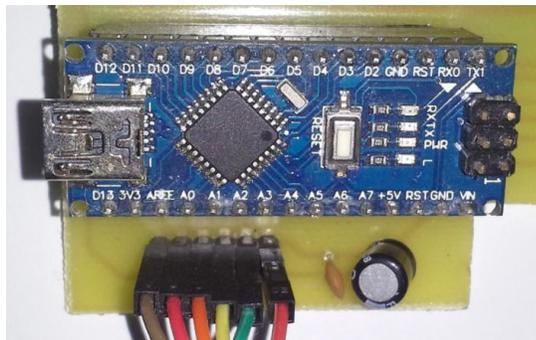


Figura 6 – Arduino Nano ATmega328
Fonte: Fabio Toshio Yamamoto

Apesar do *hardware* do arduino possuir tudo o que era necessário para o projeto, no decorrer do desenvolvimento ele apresentou problemas nas configurações de

tempo, de modo que foi necessária sua substituição por um microcontrolador. Devido à disponibilidade do componente, foi escolhido o MSP430G2553, da Texas Instruments.

O MSP430 é recente no mercado de microcontroladores, e consiste em uma família de mais de 200 componentes desenvolvidos especialmente para um bom desempenho em relação ao consumo de energia e desempenho. Assim como o ATMEGA utilizado na plataforma Arduino, o MSP possui todos os periféricos normais de microcontrolador, como timers, pinos genéricos de entradas e saídas e diversos periféricos de comunicação, assim como bibliotecas criadas e mantidas pela Texas Instruments. Esta segunda etapa de desenvolvimento foi realizada utilizando a placa de desenvolvimento MSP430 launchpad, da própria fabricante, mostrada na Figura 7. O objetivo foi facilitar a migração entre as duas plataformas, visto que, assim como o Arduino nano, esta placa contém todas as partes básicas necessárias para gravação e funcionamento do sistema.



Figura 7 – MSP430 Launchpad.
Fonte: Texas Instruments

A terceira etapa de desenvolvimento da parte física do controlador foi a construção de uma placa dedicada para esta aplicação.

4.4 MOTOR

O sistema de manobra da máquina agrícola é composto, basicamente, por um motor de passo ligado ao volante através de um sistema de transmissão por correntes. A principal vantagem da utilização de um motor de passo é a possibilidade de modificar

com precisão o ângulo do volante em malha aberta, ou seja, sem precisar de sensor para verificar a atuação.

O motor de passo é tipo bipolar e tem resistência de bobina igual a $0,5\Omega$, ou seja, quando acionado em 12V é percorrido por uma corrente de cerca de 24A. Essa característica exige a construção de *drivers* específicos de acionamento. Neste projeto, a sinalização provinda do controlador é isolada através de opto-acopladores e os sinais são adequados ao motor de passo através de duas pontes H, baseadas em transistores MOSFET IRF3205 e IRF4905, de acordo com o diagrama mostrado na Figura 8.

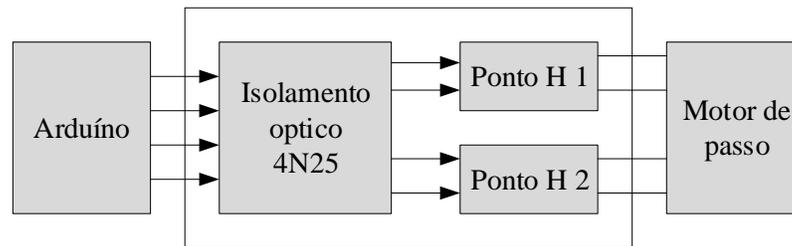


Figura 8 – Diagrama do driver de acionamento do motor de passo
Fonte: Fabio Toshio Yamamoto

4.5 CONSTRUÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE

Com a parte física funcional, mostra-se necessário a elaboração de um sistema de controle capaz de, a partir dos sinais lidos nos sensores de erro de rota, decidir a maneira como o volante deve ser manipulado a fim de que a direção seja corrigida. Ao longo do projeto foram propostas duas técnicas, apresentadas nas subseções a seguir.

4.5.1 Primeira proposta de controle

A proposta inicial de controle foi concebida durante a primeira parte do projeto, quando estava sendo utilizado o controlador na plataforma Arduino. Foi obtida de forma empírica segundo observação do funcionamento do sistema. O diagrama apresentado na Figura 9 detalha seu funcionamento.

No modelo apresentado, inicialmente era feita a leitura dos leds que indicam erro de rota, e então realizada uma correção através de uma quantidade fixa de passos

no motor. Se após o tempo de espera o erro permanecesse, então o motor era acionado novamente, aumentando o ângulo de giro no volante do trator

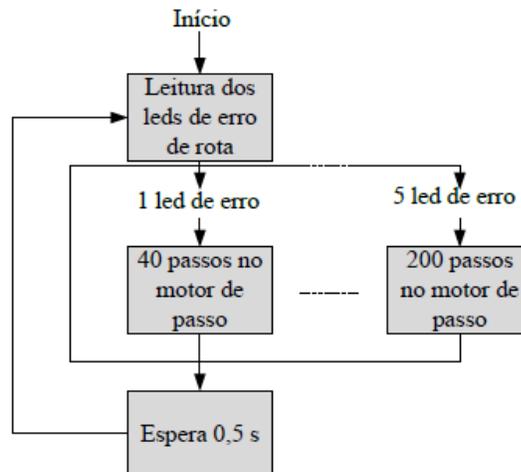


Figura 9 – Diagrama de blocos da primeira técnica de controle proposta.
Fonte: Fabio Toshio Yamamoto

O programa de implementação desse sistema é relativamente simples e demanda apenas de processos sequenciais, sem necessidade de controle de tempo de forma paralela.

4.5.2 Segunda proposta de controle

Uma segunda proposta de controle foi implementada baseado-se na modelagem PID. Para isso, a principal referencia utilizada foi a Seção 1.5 do livro Sistemas de Controle: princípios e métodos de controle, porém com diversas adaptações para utilização prática neste projeto. Uma das principais características desta aplicação é que o controle é digital e a direção apresenta características próprias em relação à amostragem do erro e à saída. A Figura 9 mostra um diagrama de blocos do sistema, relacionando com as partes constituintes de um sistema clássico de controle.

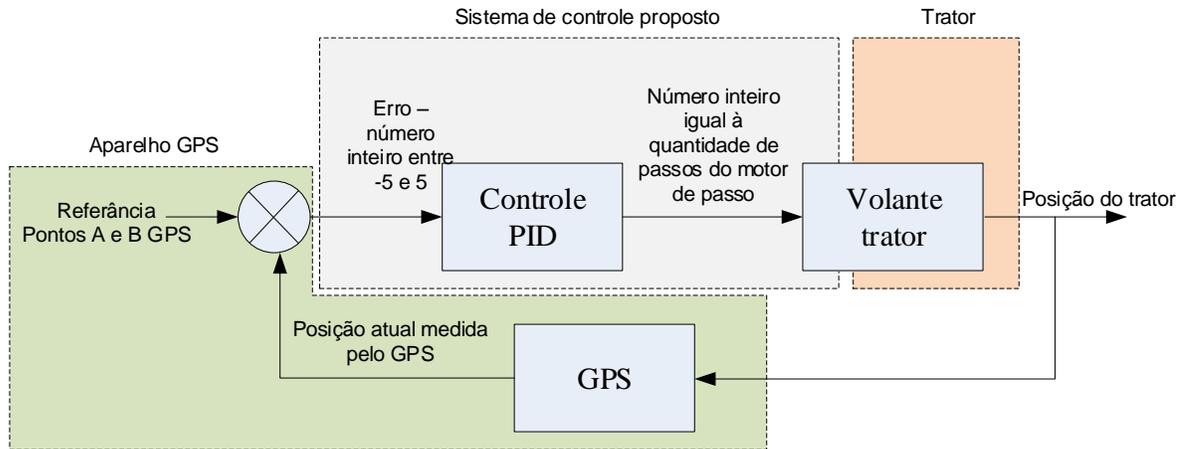


Figura 10 – Diagrama de blocos do sistema de controle proposto.
Fonte: Fabio Toshio Yamamoto

A realimentação do sistema, assim como a quantificação do erro de rota é realizada pelo equipamento GPS. O erro é lido pelos fotodiodos que geram um valor entre -5 e 5 de acordo com o LED que se encontra aceso. Cada LED indica um erro de rota de 10 cm, ou seja, o valor 3 indica erro de 30 cm para o lado direito, enquanto que -5 indica meio metro ou mais para o lado esquerdo. Essa informação é processada de acordo com os conceitos de proporcional, integral e derivativo e gera na saída um número inteiro igual à quantidade de passos que o motor executará dentro daquele período de amostragem. Se a saída é um valor positivo o motor gira o volante para que o trator se dirija para a esquerda, enquanto que se for negativo, o trator vira para a direita.

O processo deve controlar o ângulo do volante, porém o motor de passo exige que numa iteração seja definida a quantidade de passos. Dessa forma, o valor que é enviado ao motor é proporcional à diferença entre o ângulo desejado e o atual do volante. Isto equivale a dizer que a somatória da quantidade de passos enviados ao motor é diretamente proporcional ao ângulo da direção.

O tempo de amostragem do erro é fundamental e deve ser fixo, uma vez que a derivada e a integral são relacionadas com o tempo. Este parâmetro, porém, impacta nos valores das constantes K_P , K_d e K_I do controle PID. Neste projeto foi feito tempo de amostragem fixo, igual a 100ms. Em alguns casos, quando o erro é grande, um número

muito grande de passos é enviado ao motor, de forma que o tempo de atuação é maior que o tempo de amostragem. Nestes casos espera-se que o motor acabe de realizar os passos comandados anteriormente antes de realizar uma nova atualização da direção, porém a sincronicidade do período não é perdida.

Considerando uma velocidade de 10km/h do trator, em 100ms ele andar 28cm. Devido à esta característica foi incluído no programa uma limitação na velocidade com que os LEDs de erro podem mudar, ou seja, foi considerado que uma passagem de erro de mais de 1 unidade por amostragem é impossível, sendo ocasionada, provavelmente, por um erro de leitura do GPS. Desta forma, o erro de rota considerado pelos cálculos nunca possui variação maior do que 1 unidade por amostragem. Este efeito é o mesmo que uma média móvel em leitura de sensores, retirando picos de variação, valores extremos, indesejados e erros de medida pontual. A inclusão desta característica também garante que praticamente toda mudança no erro seja tratada em 1 ciclo de amostragem, de modo que, salvo em raras ocasiões, é válida a afirmativa de que o tempo de atuação do volante é sempre menor que o tempo de amostragem.

A implementação do controle foi feita considerando a quantidade de passos no motor diretamente proporcional ao ângulo do volante, ou seja, a saída do sistema de controle é uma fração em ângulo. Deve-se considerar, porém, que o sistema de direção é acumulativo, ou seja, se um ângulo θ é aplicado no volante, no próximo período o valor 0 graus significa que existe ainda acumulado o valor θ aplicado anteriormente, e não que o volante voltou à posição inicial.

A ação proporcional aplica um ângulo fixo no volante para um determinado erro, e este ângulo é diretamente proporcional ao valor da constante K_p . Assim, quando o erro tem variação de uma unidade, K_p passos são dados no volante e aquela posição é segurada enquanto aquele erro permanece, ou seja, o volante é acionado apenas no momento que há variação no erro.

A ação integral foi implementada baseada no sistema Diferença em Atraso, descrita pela equação a seguir:

$$I(k) = I(k - 1) + \frac{TK}{T_i} E(k)$$

Onde: $I(k)$ é o valor da integral na amostragem k ; $I(k - 1)$ é o valor da integral na amostragem anterior; $\frac{TK}{T_i}$ é uma constante que foi chamada de K_I e $E(k)$ é o erro da amostragem atual. Pela observação da equação anterior, foi verificado que o a ação integrativa nada mais é do que um aumento no ângulo do volante a cada amostragem. Dessa forma, o que foi implementado é que o volante gira um determinado ângulo a cada tempo de amostragem que permanece fora da rota. O valor do incremento angular é igual ao valor de K_I e do erro atual. Neste ponto verifica-se que a proposta empírica, apresentada anteriormente, é similar a ação integrativa.

A ação derivativa é fundamental para fazer com que o trator volte mais rapidamente à rota desejada. Sua ação é a seguinte: se o erro sofre a variação de uma unidade num período de amostragem, é dado K_D passos no sentido contrário, independentemente se o erro estava aumentando ou diminuindo. No próximo ciclo de amostragem, se o erro permaneceu constante, os passos são voltados.

A somatória dos efeitos do proporcional, integral e derivativo gera um número que é enviado ao motor de passo naquele ciclo de amostragem. A Figura 11 mostra um fluxograma básico da implementação do PID para este projeto.

Para encontrar os valores das constantes K_P , K_D e K_I foi utilizada uma metodologia empírica. Inicialmente foi deixada todas as constantes em 0 e modificado apenas K_P até ser percebido que o trator era capaz de seguir a rota criada pelo GPS. Neste caso, o volante do trator tinha que estar alinhado com a rota no momento inicial e a rota se mantém sempre oscilatória, embora não crescente. Após a determinação de um valor funcional para a constante K_P , foi realizado o mesmo para as demais. Esta metodologia não garante que os melhores valores sejam encontrados, porém é possível encontrar valores adequados.

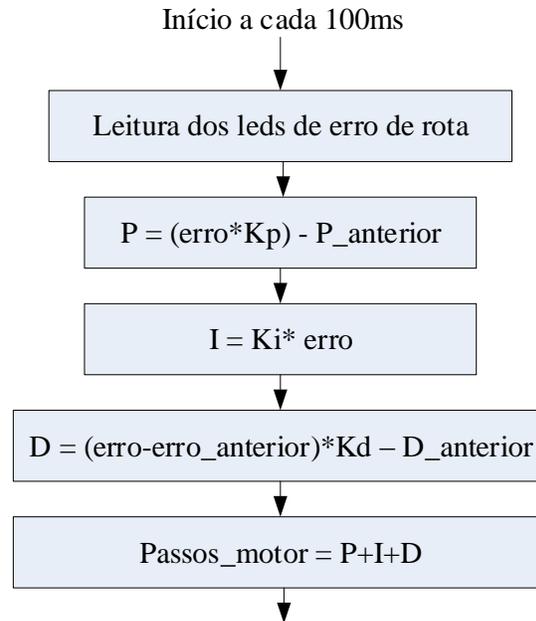


Figura 11 – Fluxograma do cálculo do controle PID utilizado
 Fonte: Fabio Toshio Yamamoto

Os gráficos mostrados na Figura 12 Mostram um exemplo da atuação dos parâmetros PID de acordo com o sistema explicado anteriormente e os valores de exemplo mostrados na Tabela 1. A cada período de amostragem os gráficos indicam a quantidade de passos enviados ao motor de passo, exceto no último gráfico, que é proporcional ao ângulo em que o volante está em relação à posição inicial.

Tabela 1 – Tabela exemplificativa do controle PID implementado.

Erro	Proporcional (10)	Integral (2)	Derivada (4)	Passos acumulados (ângulo)
0	0	0	0	0
1	10	2	4	16
1	0	2	-4	14
2	10	4	4	32
2	0	4	-4	32
1	-10	2	-4	20
0	-10	0	0	10
0	0	0	4	14
0	0	0	0	14

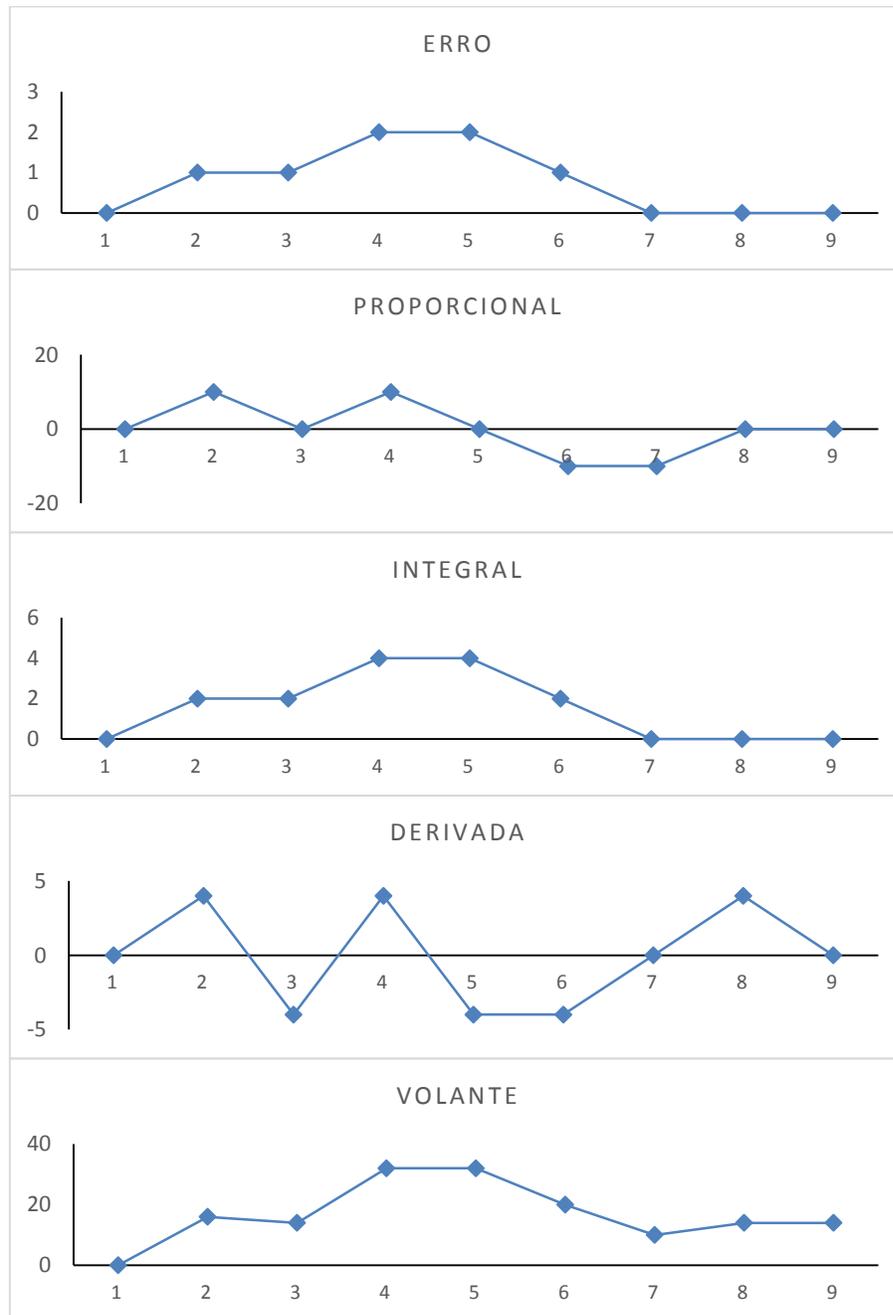


Figura 12 – Exemplo de atuação do proporcional, integral e derivativo
 Fonte: Fabio Toshio Yamamoto

O motor de passo dá 1 pulso a cada 8 ms, ficando 1ms parado entre cada pulso. Quando atinge o número total, ele suspende seu movimento. O tempo dos passos não influencia no tempo de amostragem, e esta característica foi a principal dificuldade para

utilização da plataforma Arduino.

4.6 COMUNICAÇÃO

Para ser possível a realização dos testes e ler as ações do controle foi implementada uma comunicação serial no protocolo RS232. Isso permite ligar o sistema ao computador e através de um programa de interface serial ler as informações do controle e gerar uma tabela para análise em tempo real ou posterior.

A cada ciclo de amostragem as seguintes informações são enviadas pela interface de comunicação:

Num Erro Prop Int Der PID Valid Volant

Onde Num é um número sequencial entre 0 e 999 para identificar a amostragem em relação às suas vizinhas; Erro é o valor entre -5 e 5 do erro de rota; Prop, Int e der são os valores calculados para os processos proporcional, integral e derivativo, respectivamente; PID é a somatória dos efeitos anteriores; Valid é um valor binário (0 ou 1) onde o primeiro significa que aquela amostragem é inválida devido ao motor estar realizando ações de períodos anteriores, e, por fim, volant é uma variável diretamente proporcional ao ângulo do volante.

O equipamento GPS também possui uma interface serial RS232 por onde envia a posição atual do trator utilizando o protocolo NMEA. Trata-se de um sistema que descreve coordenadas de latitude e longitude, de forma que é possível fazer os dados e traçar a rota percorrida pelo trator.

5 RESULTADOS

Os resultados do projeto podem ser separados em duas partes: montagem física e os testes práticos. A plataforma utilizada foi um trator New roland, modelo t185, ano 2014, mostrado na Figura 13.



Figura 13 – Trator New roland, Modelo T185, ano 2014
Fonte: Fabio Toshio Yamamoto

Para garantir a segurança nos testes, foi instalado um botão em que o operador poderia facilmente mudar o modo de direção entre automático (pelo sistema proposto) e manual (direção normal) em casos de manobras de retorno, desvio de obstáculos e outras necessidades. Esse botão bloqueia a ação do controlador no motor de passo sem desligar o sistema microcontrolado.

No início dos testes o protótipo foi acoplado ao trator, verificado se era possível girar o volante sem erros e se os LEDs do GPS estavam sendo lidos corretamente. Foi então configurada uma rota e iniciado o controle automático de direção. Caso o sistema apresentasse um comportamento adequado, as coordenadas de posição do trator seriam lidas através da interface serial do GPS a fim de determinar a posição, o tempo de correção de rota, a eficiência do sistema em relação à um operador humano, etc.

5.1 MONTAGEM FÍSICA

Ao longo do projeto diversas versões da parte de hardware foram construídas. Nas subseções a seguir é fornecido um breve histórico de desenvolvimento até a versão utilizada para gerar os resultados apresentados.

5.1.1 Versão um

Na primeira montagem foram utilizados LDRs, mostrada na Figura 14, para leitura do sinal luminoso do GPS. A estrutura foi feita de metal e os fios conectavam individualmente cada componente. Como os LEDs de indicação de erro do GPS são de cores diferentes, houve a necessidade de ajustar o sistema de comparação e definição de sinais alto e baixo (1 e 0) com o uso de potenciômetros. Cada LDR tinha um sistema de calibração para determinar o limiar entre ligado e desligado dos LEDs do GPS. Isto, porém, impactava no custo do projeto, dificultava a instalação e operação do sistema no trator e ainda diminuía a confiabilidade. As outras placas eletrônicas serão acomodadas na caixa mostrada na Figura 15. Nesta etapa também foi construída a estrutura física contendo o motor de passo, o sistema de transmissão e o volante, como mostra a Figura 16.

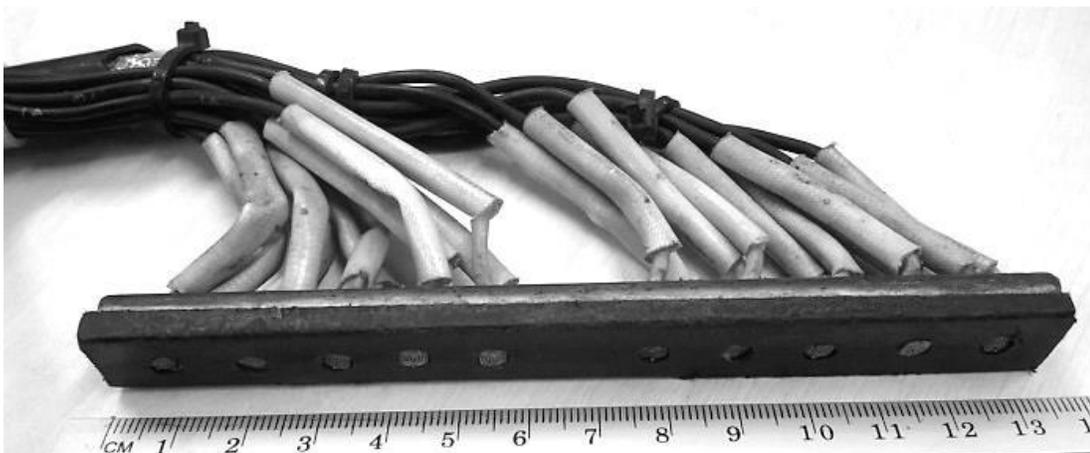


Figura 14 – Circuito de aquisição de Dados Montado com LDR.
Fonte: Fabio Toshio Yamamoto

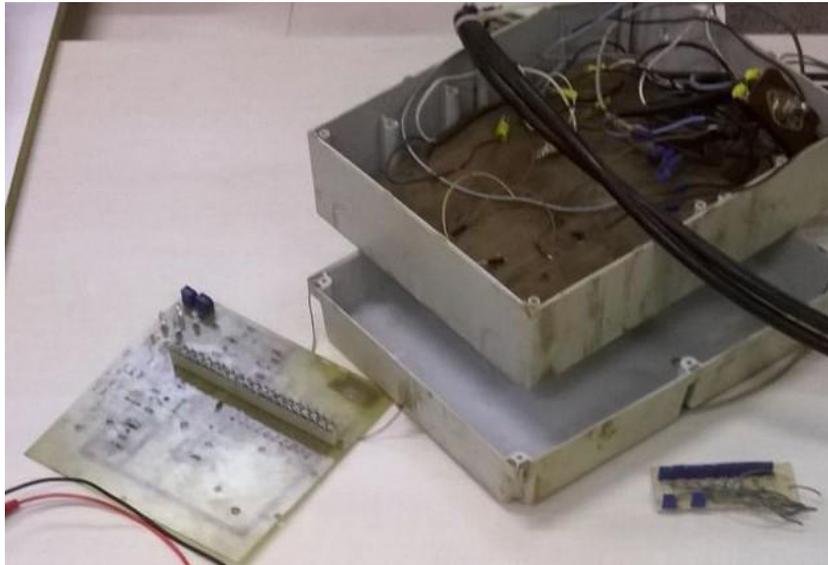


Figura 15 – Detalhes da primeira montagem
Fonte: Fabio Toshio Yamamoto



Figura 16 – Volante e sistema de transmissão.
Fonte: Fabio Toshio Yamamoto

Nestas bases, junto com o Arduino e a proposta empírica de controle, foi realizado o primeiro teste do projeto. Nesta ocasião o sistema se mostrou instável, ou seja, o erro de rota aumentava e o trator sempre se afastava do caminho desejado em

forma oscilatória, a ponto de sair da estrada onde foram realizados os experimentos. Neste ensaio verificou-se a necessidade de melhorar a montagem eletrônica e também de modificar o controle. Ficaram definidas, porém, as peças que compõem o sistema de atuação do volante.

5.1.2 Versão 2

Nesta segunda montagem foram projetadas e construídas novas placas eletrônicas a fim de aumentar confiabilidade, diminuir o tamanho físico e facilitar a adaptação no trator. Nesta etapa os LDRs foram substituídos por fotodiodos e não houve necessidade de regular a sensibilidade dos mesmos. Como mostra a Figura 17, a placa do controlador foi adaptada junto com a dos fotodiodos, o que diminuiu drasticamente a ocorrência de maus contatos e erros de leitura dos LEDs do GPS. As únicas conexões externas são da alimentação, proveniente da bateria do trator na tensão de 12 V, e 4 sinais de comando do motor de passo.

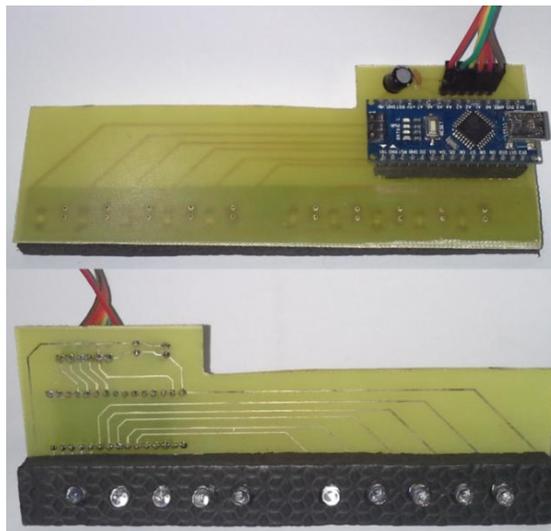


Figura 17 – Circuito montado com Foto diodos.
Fonte: Fabio Toshio Yamamoto

A Figura 18 mostra as placas que compõem o *hardware* nesta versão do projeto. Destaca-se que na placa do driver do motor de passo todas as entradas são isoladas do circuito de acionamento através de opto acopladores, impedindo que

transientes ou problemas na parte de maior potência afete o sistema de comando.

Nos experimentos realizados com essas placas foram verificados alguns problemas, como a impossibilidade de continuar utilizando o Arduino como controlador e o aquecimento excessivo dos transistores. Por estes motivos, um novo projeto foi realizado. Ficou estabelecido, porém, os esquemáticos das placas do driver e dos fotodiodos.

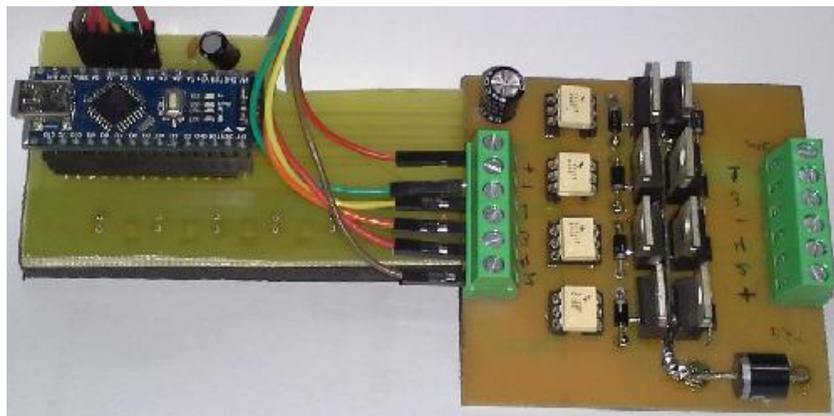


Figura 18 – Circuito completo do controlador de direção da montagem 2.
Fonte: Fabio Toshio Yamamoto

5.1.3 Versão 3

Nesta terceira e última montagem o projeto foi separado em 3 placas eletrônicas: uma para a leitura dos LEDs do GPS, outra para driver do motor de passo e outra para o controlador. A Figura 19 mostra a placa de controle projetada com o microcontrolador MSP430G2553. Foram utilizados fotodiodos na configuração definida na montagem 2 e os drivers foram posicionados diretamente em um dissipador de calor, como mostra a Figura 20.

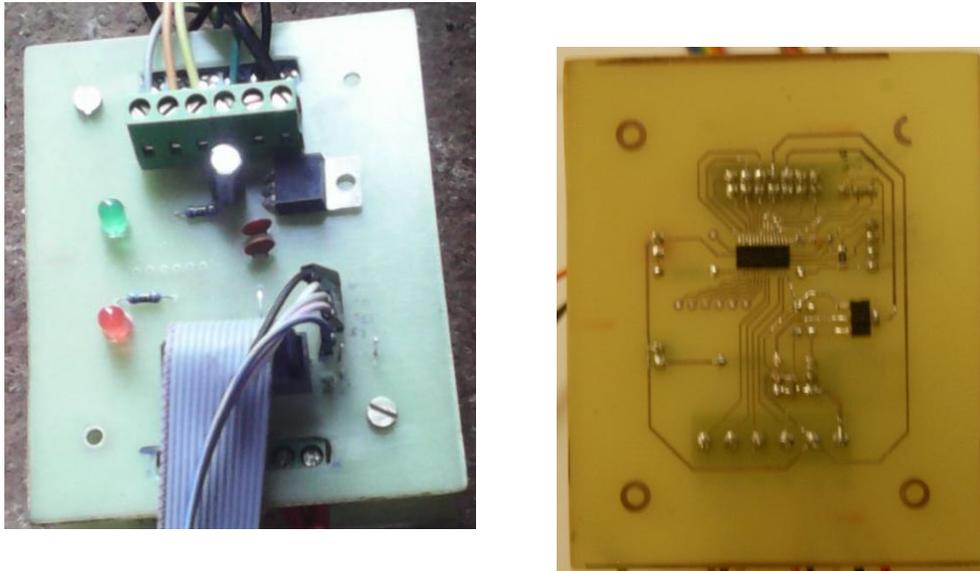


Figura 19 – Placa de controle com MSP430G2553
Fonte: Fabio Toshio Yamamoto

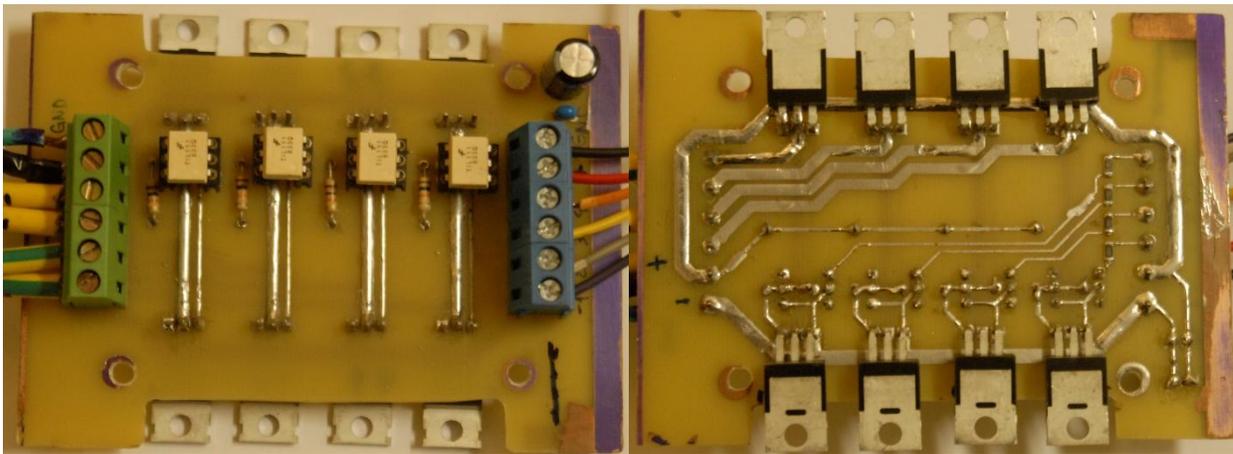


Figura 20 – Placa de driver da montagem 3.
Fonte: Fabio Toshio Yamamoto

A Figura 21 apresenta a montagem final das placas eletrônicas. Esta estrutura foi colocada no trator, como mostra a Figura 22 e o sistema estava pronto para os testes práticos.



Figura 21 – Montagem final das placas
Fonte: Fabio Toshio Yamamoto



Figura 22 – Adaptação do sistema ao trator para coleta dos dados.
Fonte: Fabio Toshio Yamamoto

5.2 RESULTADOS PRÁTICOS

Os testes práticos foram realizados em Medianeira, Paraná, a partir do dia 28 de outubro de 2017. Foi escolhida uma estrada rural, em local aproximadamente plano e com calçamento poliédrico. Os gráficos abaixo mostram um trajeto de aproximadamente 150 metros. Neste local não foi possível realizar testes mais longos devido às curvas da estrada.

Para obtenção dos dados o GPS foi configurado para criar uma rota retilínea. Neste modo, o operador do trator fornece um ponto inicial, chamado de ponto A, guia manualmente a máquina até outro ponto e atribui como ponto B. O GPS então cria uma reta e passa a indicar desvios através dos LEDs de indicação de erro. O gráfico da Figura 23 mostra o erro de rota em função do número da amostragem.

Observa-se que o primeiro erro lido se inicia na amostragem acima de 101. Isso se deve ao fato de que o sistema era colocado em funcionamento, e, após uma conferência se tudo estava funcionando normalmente, o operador colocava o trator em movimento. Neste caso, o volante foi deixado inicialmente numa posição diferente de 0 grau, ou seja, as rodas do trator não estavam paralelas à rota. Isso foi feito para verificar se o sistema de controle seria capaz de corrigir o ângulo do volante e seguir na rota desejada.

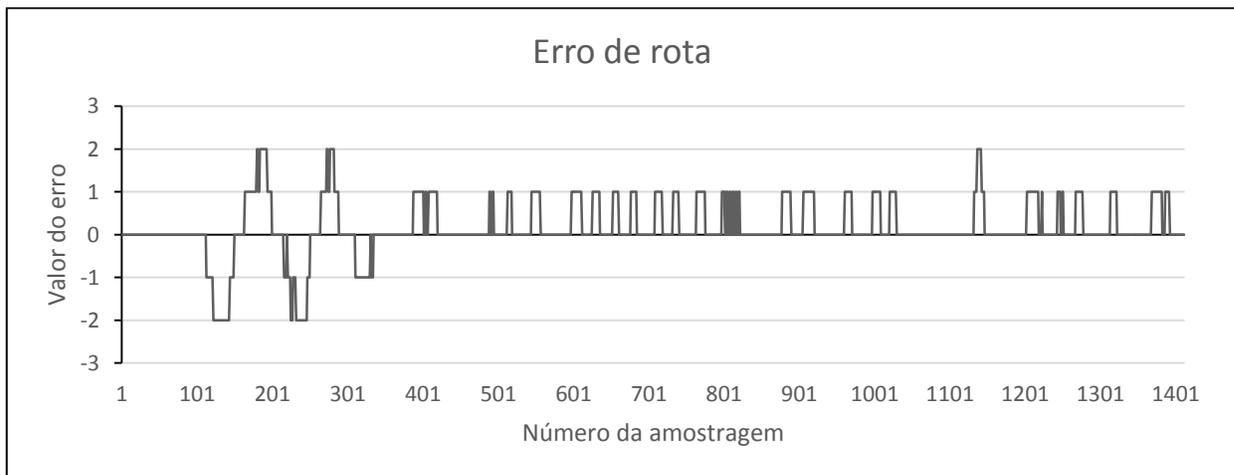


Figura 23 – Gráfico do erro de rota

Os valores das constantes PID encontrados previamente foram 32 para o proporcional, 4 para a integral e 4 para a derivada. O gráfico da Figura 24 mostra a ação proporcional de acordo com o erro de rota. Percebe-se que a ação desta no volante é pontual, ou seja, se o erro de rota aumenta uma unidade num período de amostragem, então o volante é atuado naquele mesmo período. Se o erro permanece na próxima amostragem, então aquela posição é segurada, ou seja, o volante

permanece parado. Quando o erro volta para 0, então o volante é girado na direção contrária de modo que o ângulo volta para a posição inicial

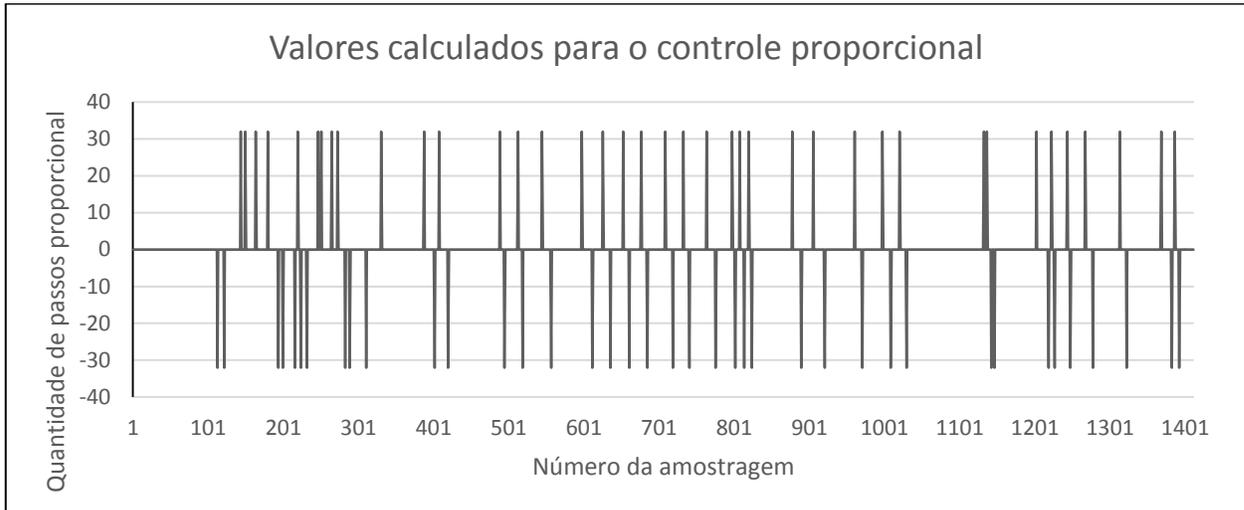


Figura 24 – Quantidade de passos devido à ação proporcional

A Figura 25 mostra a atuação da integral no controle do volante. Neste caso, observa-se que a partir da amostragem 401 houve uma tendência para que a atuação sempre se acumulasse positivamente. Isso ocorreu, provavelmente, devido ao fato das rodas do trator não estarem alinhadas com a rota inicialmente. Isso deve causar um acúmulo no ângulo do volante de modo que após um certo período o erro estacionário é 0.

A Figura 26 mostra a atuação da derivada no controle do volante. Este efeito atua no momento de variação do erro, e age no sentido de o corrigir o mais rapidamente possível.

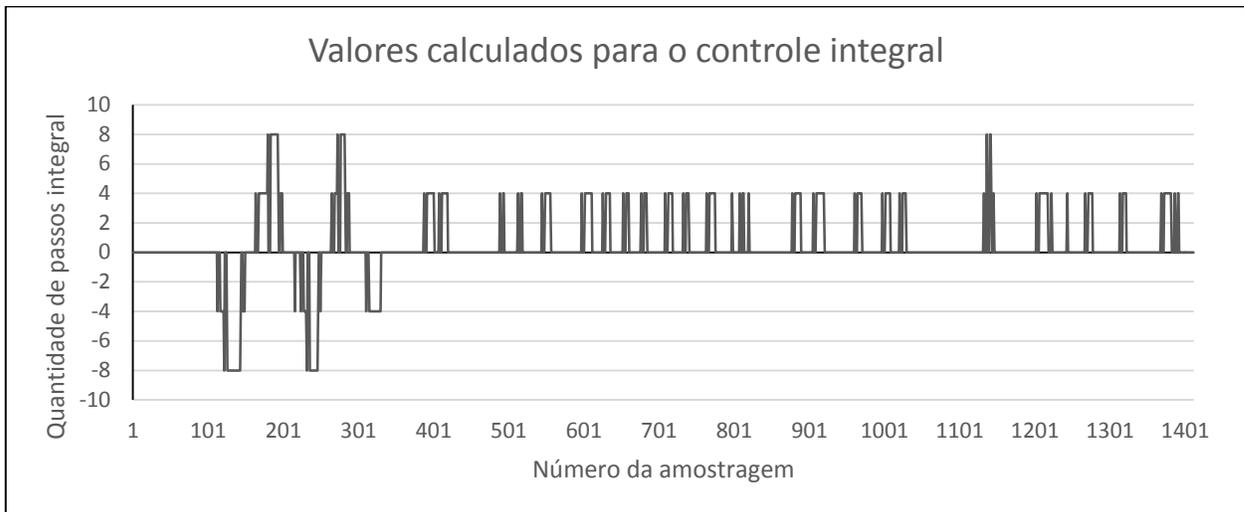


Figura 25 – Quantidade de passos devido à ação integral

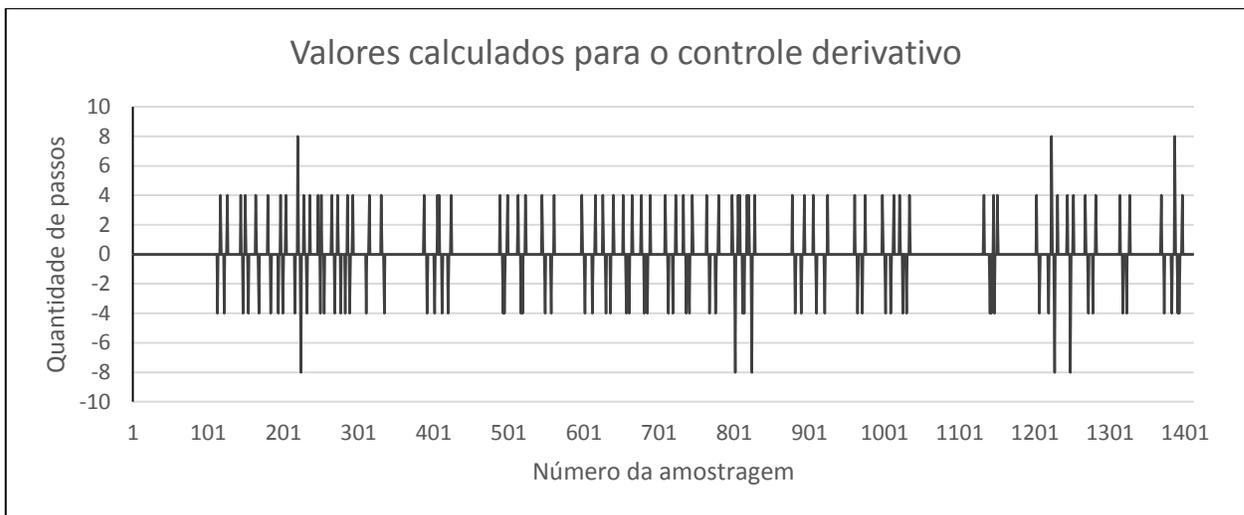


Figura 26 – Quantidade de passos devido à ação derivativa

A Figura 27 mostra a quantidade de passos efetivamente enviada ao motor de passo a cada período de amostragem enquanto a Figura 28 mostra a quantidade de passos acumulados no volante, valor que é diretamente proporcional ao ângulo.

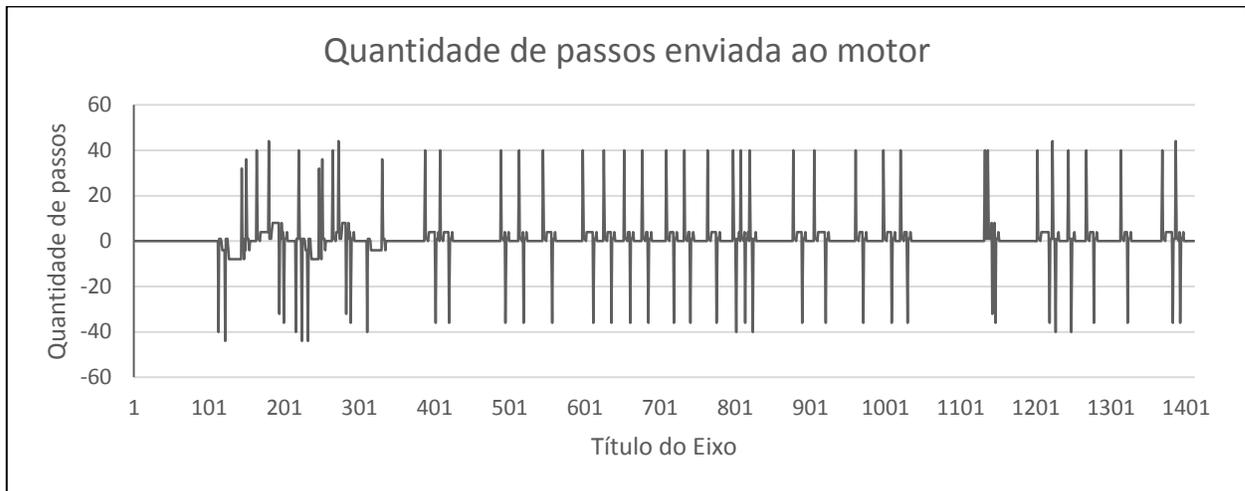


Figura 27 – Quantidade de passos efetivamente enviada ao motor para atuação no volante a cada período de amostragem

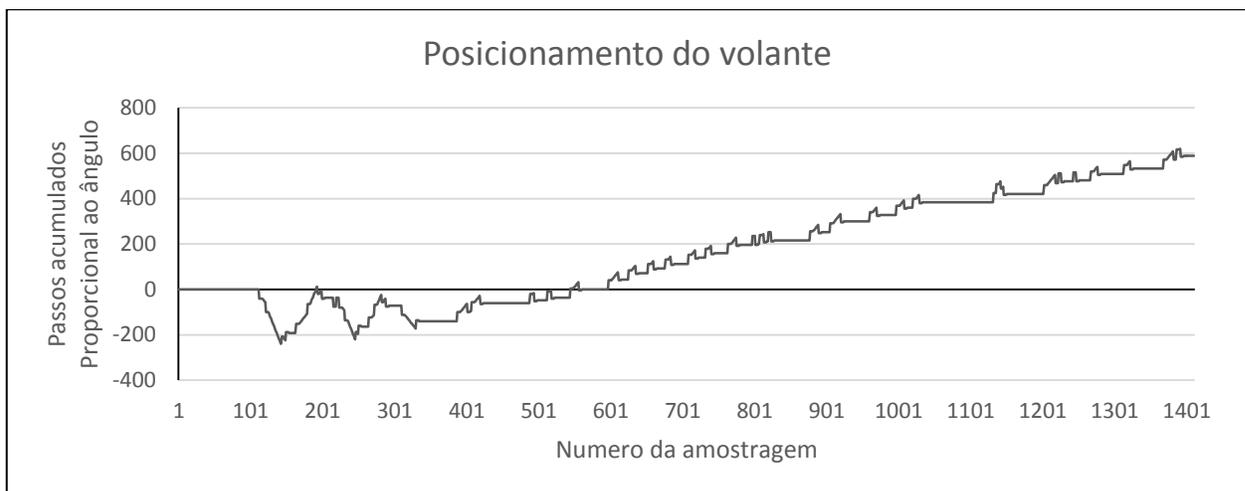


Figura 28 – Posição do volante.

Na Figura 28 percebe-se que o valor de passos acumulados no volante aumenta ao longo do tempo devido à ação integrativa. Isso se deve ao fato do volante, inicialmente, não estar numa posição paralela à rota do GPS, porém o aumento angular pode ser referente também a outras situações impostas pela parte física. Por exemplo, no acoplamento do volante ao motor de passo existe uma folga, ou seja, se o motor gira um número de passos pequeno o volante não se movimenta. Outro fenômeno é que o

motor de passo deve ser acionado sequencialmente para produzir giro, porém no primeiro passo, dependendo da posição do rotor e a bobina acionada, o eixo pode girar até mesmo no sentido inverso ao desejado. Logo, quando o motor é acionado com poucos passos, como no caso de atuação da integral, pode ser que nenhuma, ou pouca ação seja efetivamente realizada no volante do trator. A irregularidade do terreno ou as regulagens do trator também podem ajudar a explicar o comportamento observado. Mesmo com estes efeitos, no gráfico da Figura 28 percebe-se que existe uma tendência de estabilização no acumulado do motor, mostrando efetivamente o funcionamento do efeito integrativo.

O resultado de todas as figuras e gráficos apresentados anteriormente são mostrados na Figura 29, que exibe a posição do trator em coordenadas de latitude e longitude lidos diretamente do aparelho GPS.

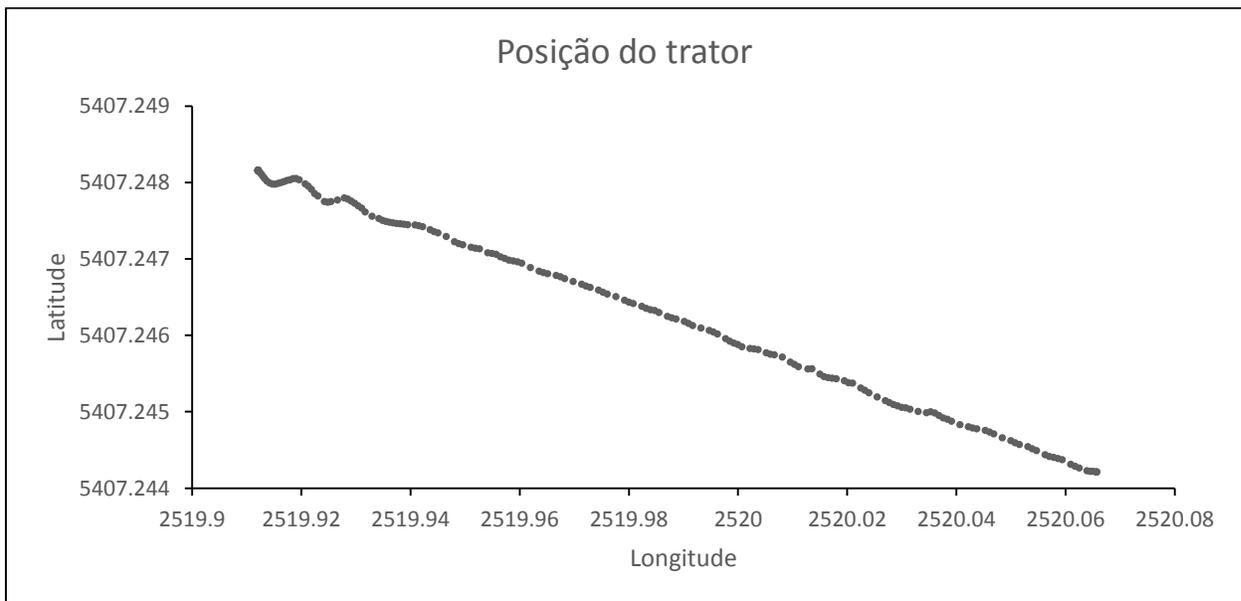


Figura 29 – Posição do trator em latitude e longitude

No início do movimento percebe-se uma pequena oscilação no caminho percorrido. Isso se deve ao fato de que o volante iniciou de forma não paralela à rota. Após esta oscilação, porém, durante todo o percurso foi mantido uma rota retilínea.

Pequenas perturbações podem ser explicadas pela irregularidade do terreno e erros do GPS. Ao longo dessa curva de teste obteve-se desvios máximos de 30 cm, para os dois lados, de forma que é provada a eficácia do controle implementado e do sistema como todo.

5.3 ESTUDOS DE CASOS

Diversos testes foram executados no trator, porém na sessão 5.2 foi apresentado apenas um destes. Nesta sessão serão comentadas algumas situações observadas em outros ensaios.

Na Figura 30 pode ser observado o rasto do trator em dois locais diferentes. A foto do lado esquerdo mostra a estrada rural de calçamento poliédrico onde foram feitas as leituras apresentadas na sessão 5.2. O rasto das rodas de um dos lados do trator, observado no centro desta imagem, mostra a trajetória percorrida, sendo possível observar locais onde pequenas correções foram executadas pelo sistema de direção automática.

A foto da Figura 30. b mostra o rasto das rodas do trator em uma plantação de soja. Nesta situação, que é a própria condição de uso de um sistema de pilotagem automática, existem diversas irregularidades no terreno, como as curvas de nível. Na foto é possível observar que pequenas oscilações são transpostas sem problemas (parte superior da foto), porém, a partir de um ponto (curva de nível visível na parte central da foto) a rota é desviada, de forma que foi necessário que o operador tomasse o controle da direção. Isso ocorreu, provavelmente, devido à inclinação do trator para transpor a irregularidade no terreno. Essa inclinação modifica a posição horizontal da antena, de modo que é interpretado pelo sistema que o trator está numa posição incorreta. Este evento deve ser corrigido em trabalhos futuros através da inclusão de sensores para medir a inclinação do trator e corrigir o posicionamento matematicamente.



Figura 30 – Rastro do trator na estada de calçamento poliédrico (a) e em uma plantação de soja (b).

Outra situação observada durante os testes foi que se por algum motivo o trator sofresse um grande desvio da rota o sistema se torna instável, ou seja, a posição do trator se torna oscilatória crescente, não convergindo para zerar o desvio. Aparentemente essa característica ocorre, principalmente, devido à ação da integral. Isso evidencia a necessidade de refinar a implementação do controle, encontrando os valores ideais das constantes K_p , K_D e K_I e impondo um valor máximo para a influência da integral na direção.

6 CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou o desenvolvimento de um sistema de direção automática para tratores agrícolas. Neste, é utilizado um GPS comercial com capacidade de criação de trajetos e indicação de desvio do caminho pré-determinado predeterminada através de LEDs. O sistema é capaz de, a partir dos sinais destes LEDs, girar o volante de maneira controlada para corrigir a rota.

Esta idéia foi iniciada no ano 2015 através de um projeto de Inovação tecnológica. Ao longo do tempo diversas versões de hardware e software foram elaboradas. Na primeira versão foram utilizados sensores inadequados, que precisavam de ajuste de sensibilidade, porém foi criada a estrutura mecânica de acionamento do volante. Na segunda versão foi melhorada a montagem eletrônica e iniciou-se uma implementação de controle baseada na modelagem PID. Na terceira versão foram tomadas medidas para combater os problemas de aquecimento e o controlador foi trocado do Arduino para a família MSP430 da Texas Instruments.

Com o programa criado, o sistema foi testado em laboratório, e após estes ensaios preliminares foi instalado em um trator e levado para experimento em uma estrada rural. A primeira parte foi determinar valores funcionais para as constantes da modelagem de controle PID. O trator foi então colocado em operação automática e todas as informações de controle e o posicionamento foram lidos. Verificou-se que mesmo partindo com o volante fora da posição ideal o sistema de controle corrigiu a rota com um erro máximo de ± 30 cm.

Apesar do bom desempenho do protótipo diversas melhorias ainda podem ser executadas, como aplicar metodologias para encontrar os melhores valores das constantes do controle e implementar a leitura das coordenadas do GPS pela serial e fazer os próprios cálculos das rotas e dos erros. Com isso acredita-se que seria possível seguir rotas curvas e diminuir ainda mais o desvio em relação à rota pré-determinada.

Uma característica observada foi que o sistema é incapaz de manter a rota

quando necessita vencer curvas de nível ou quando o trator modifica o ângulo de trabalho. Isso se deve, provavelmente, à mudança na posição da antena do GPS, de forma que o sistema entende como se fosse um desvio de rota e tenta corrigir um erro que na verdade não existe. Futuramente, podem ser utilizados acelerômetros ou outros dispositivos para auxiliar no cálculo da coordenada GPS a fim de que o sistema não fique susceptível a estes casos.

REFERÊNCIAS

AMBROSIO, J. N.;MAGGI, M. F. **Acidentes de trabalho relacionados à atividades agrícolas**. Cascavel: Acta Iguazu, 2013.

ARDUINO. Disponível em: <https://www.arduino.cc> . Acesso em 09 mai.2017.

BELEÑO, R.D.H. **Proposta de uma Plataforma de Testes para o Desenvolvimento de Veículos Autônomos**. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2012.

DEBIASI, H. **Diagnósticos dos acidentes de trabalho e das condições de segurança na operação de conjuntos tratorizados**. Santa Maria, 2003.

DIAS, E. C. **Condições de vida, trabalho, saúde e doenças dos trabalhadores rurais no Brasil**. RENAST - Saúde do Trabalhador Rural, 2006.

FERNANDES, H. C.;MADEIRA, N. G.;TEIXEIRA, M. M.;CECON, P. R. C; LEITE, D. M. **Acidentes com tratores agrícolas: natureza, causas e consequências**. Viçosa: Engenharia na Agricultura, 2013.

GABRIEL, T. A. R. **Desenvolvimento de baixo custo de um veículo terrestre não tripulado**. Rio de Janeiro: Instituto Militar de Engenharia, 2014.

GPSORG. **Sistema de Aumento**. Disponível em: <http://www.gps.gov/systems/augmentations/>. Acesso em: 10 mai. 2017.

GARRASTAZÚ, M. C. **Manual de orientação e uso do GPS de navegação**. Colombo: Embrapa Florestas, 2011.

GREGO, C. R.; RABELLO, L. M.; BRANCALÍÃO, S. R.; VIEIRA, S. R.; OLIVEIRA, A. **Geoestatística aplicada a condutividade elétrica do solo e altitude do solo cultivado com cana-de-açúcar**. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. (Ed.). Agricultura de precisão: um novo olhar. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011. p. 245-248.

HERNANDEZ, R. D; VITOR, G. B.; FERREIRA, J. V.; MEIRELLES, P. S. **Proposta de uma Plataforma de Testes para o desenvolvimento de Veículos Autônomos**. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Automática, CBA 2012.

HURN, J. **GPS - A guide to the next utility**. Trimble Navigation, Sunny vale, Estados Unidos, 1989.

JOHN DEERE. **Piloto Automático Universal 200** - AutoTrac Universal 200™. Disponível em: https://www.deere.com.br/pt_BR/products/equipment/agriculture_management_solution/s/guidance_system/autotrac_universal_200/autotrac_universal_200.page? Acesso em:

15 mai. 2017.

LOGSDON, T. **The NAVSTAR Global Positioning System**. Van Nostrand Reinhold, Nova Iorque, Estados Unidos, 1992.

OLIVEIRA, A. A.; CARVALHO, F. K. **TuKolk: Um jogo de console utilizando a plataforma Arduino**. Rio de Janeiro: Universidade Federal do Estado do Rio de Janeiro, 2014.

RABELLO, L. M. **Condutividade elétrica do solo, tópicos e equipamentos**. São Carlos: Embrapa Instrumentação Agropecuária, 2009.

RESENDE, A. V.; VILELA, M. F. **Avaliação geral, resultados e perspectivas do uso de agricultura de precisão em culturas anuais**. In: INAMASU, R. Y.; NAIME, J. M.; RESENDE, A. V.; BASSOI, L. H.; BERNARDI, A. C. C. (Ed.). *Agricultura de precisão: um novo olhar*. São Carlos: Embrapa Instrumentação, 2011.

SENAR - **Serviço Nacional de Aprendizagem Rural. Máquinas Agrícolas: tecnologias de precisão**. Brasília, 2012.

SABBAGH, V.B. **Desenvolvimento de um Sistema de Controle para um Veículo Autônomo**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.

SMIDT, A.C.G. **Implementação de uma plataforma robótica controlada remotamente utilizando o Arduino**. São Carlos, 2013.

Bazanella, A.S. **Sistemas de Controle: princípios e métodos de projeto**. UFPGS. ISBN: 9788570258496. 2005.