



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

CAMPUS DE BAURU



CONRADO DI RAIMO

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM PROTÓTIPO AUTOMATIZADO PARA
DOSAGEM PONTUAL DE FERTILIZANTES SÓLIDOS EM TAXAS VARIÁVEIS**

Bauru – SP

2011

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE ENGENHARIA**

CONRADO DI RAIMO

**DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM PROTÓTIPO AUTOMATIZADO PARA
DOSAGEM PONTUAL DE FERTILIZANTES SÓLIDOS EM TAXAS VARIÁVEIS**

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica, para obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Edson A. Capello Sousa

Co-orientador: Prof. Dr. João Eduardo Guarnetti
dos Santos

Bauru - SP

2011

Di Raimo, Conrado

Desenvolvimento e análise de um protótipo automatizado para dosagem pontual de fertilizantes sólidos em taxas variáveis / Conrado Di Raimo, 2011.

76 f. il.

Orientador: Edson Antonio Capello Sousa
Co-orientador: João Eduardo Guarnetti dos Santos

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2011.

1. Agricultura de precisão. 2. Dosagem variável. 3. Fertilização. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE CONRADO DI RAIMO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DO(A) FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU.

Aos 24 dias do mês de março do ano de 2011, às 14:30 horas, no(a) ANFITEATRO DA SEÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO DA FACULDADE DE ENGENHARIA, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDSON ANTONIO CAPELLO SOUSA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. JOSÉ PAULO MOLIN do(a) Departamento de Engenharia de Biossistemas / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" - USP, Prof. Dr. BENTO RODRIGUES DE PONTES JUNIOR do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de CONRADO DI RAIMO, intitulado "DESENVOLVIMENTO E ANÁLISE DE UM PROTÓTIPO AUTOMATIZADO PARA DOSAGEM PONTUAL DE FERTILIZANTES SÓLIDOS EM TAXAS VARIÁVEIS". Após a exposição, o discente foi argüido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que, após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Prof. Dr. EDSON ANTONIO CAPELLO SOUSA

Prof. Dr. JOSÉ PAULO MOLIN

Prof. Dr. BENTO RODRIGUES DE PONTES JUNIOR

DEDICATÓRIA

A Deus, por permitir que viesse a esse mundo. A minha esposa Nelci, fiel e eterna companheira. A minha filha Amanda, como exemplo a ser seguido. Aos meus Pais, Mario Giulio (in memoriam) e Santina, por tudo que fizeram por mim durante a minha vida acadêmica.

AGRADECIMENTOS

Antes de tudo quero agradecer a Deus e a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram, não só pela realização deste trabalho, mas também, por todo o processo de aprendizado durante este período.

Ao meu orientador Prof. Dr. Edson Antonio Capello Sousa, pela oportunidade e confiança em mim depositada, Professor da (FEB/UNESP).

Ao meu co-orientador Prof. Dr. João Eduardo Guarnetti dos Santos, pelas informações prestadas sobre máquinas agrícolas, Professor da (FEB/UNESP).

Ao meu grande amigo e companheiro Prof. Dr. Marcio Aurelio Furtado Montezuma, pelos princípios e constante colaboração em todas as etapas deste trabalho, Professor da (UTFPR) Campus Cornélio Procopio.

Ao Prof. Dr. Bento Rodrigues de Pontes Junior, pelo apoio prestado na área elétrica e de controle, Professor da (FEB/UNESP).

Ao Prof. Dr. Jose Paulo Molin, pelos ensinamentos sobre agricultura de precisão, Professor e pesquisador da (ESALQ/USP).

Ao meu amigo Jorge Nicolau dos Santos, pela colaboração na programação do LabVIEW®, Engenheiro Eletrônico e laboratorista da (USP) Campus São Carlos.

A Cooperativa Agropecuária de Pedrinhas Paulista em nome do seu Diretor Presidente Franco Di Nallo, pela doação dos fertilizantes utilizados nos ensaios, e a todos os Engenheiros Agrônomos do departamento técnico, pelas informações agronômicas prestadas.

A Horizon Comercial Agrícola em nome do seu Gerente Geral Martin StremLOW, pelo pronto atendimento na doação dos dosadores helicoidais para a construção da bancada de testes, e a todos os colaboradores da filial de Cornélio Procopio.

Ao meu primo Antonio Alberto Di Raimo, pela contribuição na construção da primeira bancada de testes, Mecânico entusiasta e grande incentivador do trabalho.

Ao meu amigo Antonio Franco Neto, pela disposição em fornecer informações referentes a agricultura de precisão, Agricultor e inovador tecnológico.

Ao meu amigo Fabio Frediane, pelo apoio na confecção dos desenhos do protótipo, grande desenhista de máquinas e Tecnólogo Mecânico.

Ao meu amigo Wanderlei Malaquias, pelo aporte na montagem do protótipo, Tecnólogo Mecânico e laboratorista da (UTFPR) Campus Cornélio Procopio.

EPÍGRAFE

“Uma descoberta não consiste em ver o que todo mundo não viu, mas em pensar o que ninguém ainda pensou.”

Albert Ezent Gyorgy

RESUMO

A crescente demanda por alimentos no mundo, com a mesma área agrícola e com os recursos financeiros para a aquisição de fertilizantes, cada vez mais escassos é inevitável à utilização de novas tecnologias para fazer frente a essa nova realidade, pois com o uso dessas pode-se produzir mais alimentos com menos fertilizantes. Na busca por novas tecnologias que fazem o processo produtivo mais eficiente é que surge a chamada “Agricultura de Precisão” utilizada como uma alternativa para aperfeiçoar o processo de produção agrícola. As ações que conduzem à chamada agricultura de precisão exigem diversas etapas para sua implementação. Contudo, uma das mais importantes está relacionada com o tratamento localizado das culturas, para isto, tem-se a necessidade de desenvolver equipamentos capazes de executar tais tarefas. Com esse intuito estudou-se o comportamento de um protótipo que tem como objetivo dosar e aplicar no momento do plantio, três fertilizantes sólidos simultâneos, que são: Nitrogênio, Fósforo e Potássio (N, P e K) em taxas variáveis de acordo com as quantidades desejáveis da cultura em questão. Para a avaliação do protótipo foi construída uma bancada de testes onde foram acoplados os dosadores helicoidais e seus respectivos motores elétricos de corrente contínua e três tanques para armazenamento de fertilizantes. Também foram utilizados equipamentos complementares tais como: uma fonte (12vdc); três drivers de potência (MOSFET); um Desktop; uma placa de aquisição e controle e um software de Instrumentação Virtual. Os ensaios foram realizados com o software de instrumentação e controle virtual (LabVIEW®), que teve como função, controlar a rotação dos eixos dos três motores de maneira independente, baseando-se em dados de um mapa de fertilidade do solo com localização fundamentada em informações geográficas, obtendo a vazão mássica do produto desejado no local exato e na quantidade necessária para a planta, conforme o tamanho da grade amostral do solo. Os valores da vazão mássica, determinada em função do tempo, foram comparados com os valores da massa de fertilizantes indicados no mapa de aplicação. Assim, a precisão do sistema será maior quanto menor for a diferença desses valores. Nos ensaios realizados, os resultados obtidos para alta, média e baixa vazão foram atingidos com pequena variação em torno dos valores de referência. Com isso, espera-se uma redução nos custos de produção devido a menor quantidade de insumos utilizada, evitando o desperdício dos nutrientes químicos e a diminuição dos danos ao meio ambiente.

Palavras chave: agricultura de precisão, dosagem variável, fertilização.

ABSTRACT

The increasing demand for food in the world with the same agricultural area and the financial resources to purchase fertilizers, more and more scarce it is inevitable to use new technologies to confront this new reality, because with the use of these can produce more food with less fertilizer. In the search for new technologies that make the production process more efficient arises the called "precision agriculture" used as an alternative to improve the agricultural production process. The actions that lead to the called precision agriculture require several steps for its implementation. However, one of the most important is related to the localized treatment of cultures, for this, there is the need to develop equipment capable of performing such tasks. With this aim we studied the behavior of a prototype which aims to meter and apply at the planting moment three simultaneous solid fertilizers, which are: nitrogen, phosphorus and potassium (N, P and K) with variable rates according with the desired quantities of the culture in question. For the evaluation of the prototype was built a test bench where were engaged the helical dosers and their respective direct current electric motors and three tanks for storage of fertilizers. Were also used additional equipment such as: a source (12vdc), three power drivers (MOSFET), a desktop, an acquisition board and control software and virtual instrumentation. The tests were performed with the software virtual instrumentation and control (LabVIEW®), which had as its objective to control the rotation of the axes of the three engines independently, based on data from a map of soil fertility based on location information geographical, obtaining the mass flow of the desired product in the exact location and quantity needed for the plant, according to the size of grid soil sampling. The values of the mass flow rate determined by the time were compared with the values of the mass indicated on the map of fertilizer application, the system's accuracy will be greater the lower the difference between these values. In these tests the results for high, medium and low flow were achieved with little variation around the reference values. Thus we expect a reduction in production costs due to fewer amounts of inputs used, avoiding the waste of chemical nutrients and reduction of environmental damage.

Keywords: precision agriculture, variable dosage, fertilization.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - CICLO DA AP.....	20
FIGURA 2 - APLICAÇÃO ON-LINE.....	23
FIGURA 3 - APLICAÇÃO OFF-LINE.....	24
FIGURA 4 - APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE A LANÇO.....	26
FIGURA 5 - IMPLEMENTO SULCADOR ADUBADOR.....	27
FIGURA 6 - MÁQUINA ADUBADORA-SEMEADORA.....	27
FIGURA 7 - ESQUEMA DA APLICAÇÃO DO FERTILIZANTE NO MOMENTO DA SEMEADURA.....	28
FIGURA 8 - CULTIVADOR ADUBADOR COM COBERTURA.....	28
FIGURA 9 - DIAGRAMA DE BLOCOS (MALHA ABERTA).....	31
FIGURA 10 - PAINEL DE CONTROLE (MALHA ABERTA).....	32
FIGURA 11 - DIAGRAMA DO CONTROLE REALIMENTADO.....	33
FIGURA 12 - PAINEL DE CONTROLE (MALHA FECHADA).....	35
FIGURA 13 - DIAGRAMA DE BLOCOS (MALHA FECHADA).....	36
FIGURA 14 - DESENHO EM 3D DA BANCADA DE TESTES.....	41
FIGURA 15 - ESTRUTURA METÁLICA.....	42
FIGURA 16 - MOEGA DE ARMAZENAMENTO.....	42
FIGURA 17 - DOSADOR HELICOIDAL.....	43
FIGURA 18 - MOTOR ELÉTRICO.....	43
FIGURA 19 - DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DO CONJUNTO.....	44
FIGURA 20 - FONTE DE ALIMENTAÇÃO VARIÁVEL.....	45
FIGURA 21 - PLACA DE AQUISIÇÃO.....	46
FIGURA 22 - DRIVER DE POTÊNCIA (MOSFET).....	46
FIGURA 23 - DRIVER COM POTENCIÔMETRO.....	47
FIGURA 24 - CAIXA DE PVC COM BORNES PARA LIGAÇÃO.....	47
FIGURA 25 - ENCODER.....	48
FIGURA 26 - FOTO DA BANCADA DE TESTE.....	48
FIGURA 27 - GRID DE AMOSTRAGEM DO SOLO COM PONTOS AMOSTRAIS DETERMINADOS.....	49
FIGURA 28 - MAPA DE FERTILIDADE DO SOLO.....	50
FIGURA 29 - MAPA DE APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE.....	50
FIGURA 30 - GRÁFICO DA ROTAÇÃO VERSUS VAZÃO MÁSSICA (TEÓRICA).....	51
FIGURA 31 - (PAINEL DE CONTROLE) SIMULAÇÃO DO MOTOR COM CONTROLE PID.....	54
FIGURA 32 - (DIAGRAMA DE BLOCOS) SIMULAÇÃO DO MOTOR COM CONTROLE PID.....	55
FIGURA 33 - GRÁFICO DA ROTAÇÃO DO MOTOR SEM CARGA E DESACOPLADO (PWM-100Hz).....	61
FIGURA 34 - GRÁFICO DA AÇÃO DE CONTROLE DO MOTOR SEM CARGA E DESACOPLADO (PWM-100Hz).....	62
FIGURA 35 - GRÁFICO DA ROTAÇÃO DO MOTOR ACOPLADO SEM CARGA (PWM-100Hz).....	63
FIGURA 36 - GRÁFICO DA AÇÃO DE CONTROLE DO MOTOR ACOPLADO SEM CARGA (PWM-100Hz).....	63
FIGURA 37 - GRÁFICO DA ROTAÇÃO DO MOTOR ACOPLADO COM CARGA (PWM-100Hz).....	64
FIGURA 38 - GRÁFICO DA AÇÃO DE CONTROLE DO MOTOR ACOPLADO COM CARGA (PWM-100Hz).....	64
FIGURA 39 - GRÁFICO DA ROTAÇÃO DO MOTOR VERSUS TENSÃO DO (PWM) APLICADA.....	65
FIGURA 40 - ROTAÇÃO DO MOTOR COM FREQUÊNCIA 20Hz DO PWM.....	66
FIGURA 41 - ROTAÇÃO DO MOTOR COM FREQUÊNCIA 50Hz DO PWM.....	66
FIGURA 42 - ROTAÇÃO DO MOTOR COM FREQUÊNCIA 100Hz DO PWM.....	67
FIGURA 43 - GRÁFICO DA ROTAÇÃO DO DOSADOR VERSUS VAZÃO MÁSSICA.....	68
FIGURA 44 - ERRO DE APLICAÇÃO VERSUS ROTAÇÃO DO DOSADOR.....	69
FIGURA 45 - GRÁFICO DA ROTAÇÃO DO MOTOR 100Hz DO PWM (VARIAÇÃO DE 3RPM).....	70
FIGURA 46 - GRÁFICO DA AÇÃO DE CONTROLE DO MOTOR 100Hz DO PWM (VARIAÇÃO DE 3RPM).....	70

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - ROTAÇÃO CONVERTIDA EM VAZÃO MÁSSICA.	52
TABELA 2 - COLETA DE FERTILIZANTE EM UMA REVOLUÇÃO COMPLETA DO DOSADOR.	56
TABELA 3 - COLETA DO (QS) A 4RPM.	57
TABELA 4 - COLETA DO (QS) A 8RPM.	57
TABELA 5 - COLETA DO (QS) A 12RPM.	58
TABELA 6 - COLETA DO (QS) A 16RPM.	58
TABELA 7 - COLETA DO (QS) A 20RPM.	59
TABELA 8 - COLETA DO (QS) A 24RPM.	59
TABELA 9 - COLETA DO (QS) A 28RPM.	60
TABELA 10 - COLETA DO (QS) A 32RPM.	60
TABELA 11 - VALORES DA VAZÃO MÁSSICA DO DOSADOR HELICOIDAL.	67

LISTA DE SIGLAS

A: Área a Ser Adubada (m^2)
AP: Agricultura de Precisão
BRIX: É Uma Escala Numérica Que Mede a Quantidade de Sólidos Solúveis em Uma Solução de Sacarose
Duty Cycle: Ciclo de Trabalho ou Ciclo de serviço
 e_L : Espaçamento Entre Linhas da Cultura (m)
EMBRAPA: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Encoder: Sensor de Movimento
ESALQ: Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”
EUA: Estados Unidos da América
GPS ou SPG: Sistema de Posicionamento Global
ha: Hectare (Unidade de Área)
Hz: Hertz (Unidade de Frequência)
IAPAR: Instituto Agrônômico do Paraná
Kd: Ganho Derivativo
Ki: Ganho integral
Kp: Ganho Proporcional
MOSFET: Transistor de Efeito de Campo
PVC: Cloreto de Polivinila (Material Plástico)
PWM: Modulação por Largura de Pulso (Regulação de tensão)
 q_A : Quantidade de Adubo a Ser Distribuída por Hectare (Kg)
 $q_{F/L}$: Quantidade de Fertilizante por Linha
 q_{Fd} : Quantidade de Fertilizante Desejada Para a Área a Ser Fertilizada por (rpm)
 q_L : Quantidade de Linhas
 q_S : Quantidade Que Deve Cair em “S” (Kg)
rpm: Revoluções por Minuto (Unidade de Rotação)
S: Espaço a Ser Percorrido Pela Máquina Para o Teste de Caída (m)
SIG ou GIS: Sistemas de Informações Geográficas
t: Tempo (Unidade de tempo)
UFMS: Universidade Federal de Santa Maria
UNICAMP: Universidade de Campinas
USP: Universidade de São Paulo
v: Velocidade de Deslocamento da Máquina (m/s)
Vdc ou Vcc: Tensão de Corrente Contínua
VRT: Tecnologia de Aplicação em Taxa Variada
 W_A : Largura da Área a Ser Fertilizada (m)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1.	MOTIVAÇÃO	16
1.2.	OBJETIVO.....	16
1.3.	JUSTIFICATIVA.....	17
1.4.	ORGANIZAÇÃO DO PRESENTE TEXTO	17
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1.	AGRICULTURA DE PRECISÃO.....	18
2.2.	TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO VARIÁVEL.....	22
2.3.	MÁQUINAS PARA APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES MINERAIS SÓLIDOS	25
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
3.1.	SISTEMA DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS.....	29
3.1.1.	Sistema de Controle em Malha Aberta.....	30
3.1.2.	Sistema de Controle em Malha Fechada	33
3.2.	MODULAÇÃO DE LARGURA DE PULSO (PWM)	37
3.3.	IDENTIFICAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO.....	38
3.4.	EQUACIONAMENTO DA VAZÃO MÁSSICA	39
4	MATERIAL E MÉTODOS	41
4.1.	CONSTRUÇÃO DA BANCADA	41
4.2.	COMPONENTES ELETRÔNICOS	44
4.3.	DETERMINAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO	49
4.4.	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	51
4.4.1.	Avaliação da Dosagem Teórica do Dosador	51
4.4.2.	Conversão da Rotação do Dosador em Vazão Mássica	52
4.4.3.	Simulação computacional	53
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	56
5.1.	ANÁLISE DOS PARÂMETROS INICIAIS	56
5.2.	VERIFICAÇÃO DA VAZÃO MÁSSICA REAL DO DOSADOR	56
5.3.	AFERIÇÃO INICIAL DO MOTOR.....	60
5.4.	EFEITO DA TRANSMISSÃO	62
5.5.	AVALIAÇÃO DO TORQUE DO MOTOR	64
5.6.	TESTE DE FREQUÊNCIA DO (PWM) DO MOTOR	66
5.7.	COMPARAÇÃO DA VAZÃO MÁSSICA (TEÓRICA e REAL)	67

6	CONCLUSÕES.....	71
7	TRABALHOS FUTUROS.....	72
	REFERÊNCIAS.....	73

1 INTRODUÇÃO

A agricultura tem passado por uma série de transformações, tornando a atividade cada vez mais competitiva e exigindo do produtor maior nível de especialização, capacidade de gerenciamento e profissionalismo. Os produtores, além de administradores, cada vez mais terão que assumir a dupla função de produtores e pesquisadores de suas áreas, atuando diretamente na coleta de informações, interagindo com novas técnicas e tomando decisões eficazes de manejo. A viabilização da atividade, com a obtenção de lucro satisfatório, está sempre em risco em decorrência de fatores controláveis e incontroláveis que definem a produção agrícola. Portanto, a aplicação dos recursos disponíveis de forma eficiente é indispensável como garantia de sucesso. Para que isso possa acontecer, é crucial a obtenção de informações sobre os fatores de produção que interagem na lavoura e sobre como eles podem ser maximizados (Pires *et al.*, 2004).

No contexto global, todas as formas de economia sofrem com a redução das margens de lucros, fazendo surgir a necessidade de se obter níveis de competitividade internacionais. Além disso, a procura pela conservação dos recursos naturais impõe à atividade agrícola, novos processos e técnicas de produção, aliados à eficiência e maior controle dos resultados alcançados no campo, em relação ao que vinha sendo praticado. Como uma resposta para minimizar estes problemas e com o avanço da tecnologia, foi possível que satélites, computadores e sensores auxiliassem a agricultura fazendo com que surgisse um novo sistema de produção que, há alguns anos já é utilizado pelos agricultores de países de tecnologia avançada, chamado de *Precision Agriculture*, *Precision Farming* e no Brasil de Agricultura de Precisão (AP). Este sistema vem fazer cumprir a capacidade de conhecer cada metro quadrado da lavoura, que foi perdido à medida que as áreas cultivadas foram se desenvolvendo.

Para Molin (1997) a técnica do que se convencionou chamar de agricultura de precisão não é algo novo. Porém mais antigo que este conceito, tem sido a prática do tratamento localizado que os pequenos agricultores sempre deram às suas lavouras. Com base no conhecimento inerente e a intimidade com as condições de cada pequeno pedaço da lavoura, esses agricultores vêm praticando AP baseados na experiência e com baixa tecnologia.

No Brasil, as primeiras ações de pesquisa na área foram realizadas na Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, da Universidade de São Paulo (ESALQ-USP) em 1997, onde um trabalho pioneiro com a cultura de milho resultou no primeiro mapa de variabilidade

de colheita do Brasil (Balastreire, 1997). Houve também crescimento nas iniciativas de pesquisa/extensão em AP, com envolvimento de instituições como (ESALQ-USP), UNICAMP, EMBRAPA, Fundação ABC, IAPAR, UFSM, além de numerosas empresas privadas do setor agrícola e tecnológico de cooperativas de produtores, e de produtores de forma isolada.

O processo da AP tem como um dos propósitos buscar a variabilidade espacial da fertilidade prévia do solo, utilizando para isso uma amostragem programada e criteriosa. Com todas as informações obtidas da amostragem, parte-se para o tratamento direcionado da fertilidade do solo, aplicando corretivos e fertilizantes a taxas variáveis, buscando resolver problemas que podem vir a depreciar a qualidade e a produtividade da lavoura por falta ou excesso dos nutrientes essenciais. Hoje se consegue fazer todo o processo de amostragem de solo georreferenciada, ou seja, mapear a área retirando amostras de solo e delimitando os pontos com suas respectivas coordenadas geográficas.

Esse processo de marcação dos pontos amostrais com *Global Positioning System* (GPS) permite, posteriormente, a confecção de mapas de fertilidade de solo, ferramenta fundamental para a tomada de decisão sobre a recomendação de adubação para a cultura que se pretende cultivar. De posse das análises de solo e das coordenadas geográficas dos pontos amostrais, são gerados os mapas de fertilidade, onde se tem para cada elemento analisado um mapa mostrando as variações de concentrações de cada elemento no solo. Com o mapa de aplicação introduzido e um controlador eletrohidráulico, a mesma aplica o fertilizante em quantidades variáveis obedecendo a análise prévia da fertilidade do solo, tratando de forma diferenciada as áreas com teores distintos.

Para Dellamea *et al.* (2007), a AP é uma ótima ferramenta para a melhoria no monitoramento da fertilidade dos solos. Com ela planeja-se de forma racional a aplicação de fertilizantes e também monitora-se a evolução destes nutrientes, bem como se efetua aplicações à taxa variável, visando à melhoria nas condições de fertilidade do solo, diminuindo custos de reposição e aumentando o potencial produtivo das culturas.

De acordo com Luz *et al.* (2010), os equipamentos para aplicação de insumos sólidos podem ser a lanço, em faixa, em linhas ou sulcos. A aplicação de fertilizantes a taxa variável tem como objetivo a maximização do uso de fertilizantes e a diminuição dos impactos negativos da atividade agrícola no ambiente. O tratamento localizado, objetivo final da AP, não é, exclusivamente, uma consequência direta do uso de equipamentos dotados de sensores, sistemas de posicionamento e sistemas computacionais de controle de aplicação de insumos. Antes, é a integração destes e de outros sistemas na geração, análise e utilização de informações que refletem a variação que pode ser tratada de forma localizada.

No sistema de plantio direto é necessária a utilização de equipamentos específicos. Com isso, surge a necessidade das adequações nas máquinas que eram comumente utilizadas no sistema de produção convencional. Assim, esse equipamento passa a ser denominado de adubadora-semeadora.

Nessas máquinas o mecanismo de distribuição de fertilizante é composto por um dosador que tem a função de deslocar um determinado volume de fertilizante do reservatório até a saída do mesmo e o encaminha até o sulco de semeadura. Esse mecanismo é acionado por uma roda-de-terra, através da transmissão de corrente e engrenagem. O referido sistema tem a capacidade de manter a taxa de aplicação constante mesmo variando a velocidade da máquina. As taxas de aplicações são fixas e orientadas por tabelas e consequentes combinações de relações de transmissão.

A utilização de um sistema de acionamento elétrico se mostra como uma opção bastante interessante na substituição dos mecanismos de acionamento mecânico vinculado ao deslocamento. Em estudo realizado por (Menegatti, 2004) observou-se que, no sistema de controle eletrônico proposto pelo autor, o erro máximo entre a rotação de referência que define a taxa de aplicação de fertilizante e a rotação obtida no eixo do dosador foi de no máximo 3%, justificando-se como um grande potencial de utilização deste tipo de sistema de controle para a agricultura.

1.1. MOTIVAÇÃO

O interesse que motiva este trabalho está na necessidade de desenvolver um sistema que promova uma fertilização mais precisa, ou seja, tratar o solo (pontual) de maneira mais próxima possível dos requisitos nutricionais demandados a partir da amostragem detalhada.

1.2. OBJETIVO

A proposta deste trabalho é desenvolver um protótipo que dose e aplique de maneira localizada os fertilizantes e no momento apropriado, ou seja, depositar no local desejado os insumos necessários e na quantidade requerida pela planta numa única operação, visando à maximização do uso de fertilizantes na agricultura.

1.3. JUSTIFICATIVA

Dois fatores justificam o trabalho proposto. Um diz respeito à preservação do meio ambiente, onde se deseja ajustar as quantidades de fertilizantes jogados ao solo. O outro diz respeito à margem de lucro cada vez menor, fazendo com que o produtor use o fertilizante de forma cada vez mais racional e econômica.

1.4. ORGANIZAÇÃO DO PRESENTE TEXTO

O texto está dividido em sete capítulos que estão estruturados como segue:

- O primeiro capítulo faz uma breve introdução.
- O segundo capítulo aborda os seguintes conceitos teóricos: agricultura de precisão; aplicação de fertilizante em taxa variável e tipos de máquinas para a aplicação de fertilizantes minerais sólidos.
- O terceiro capítulo exhibe a fundamentação teórica: sistemas de controle e aquisição de dados; teoria da modulação de largura de pulso; identificação das características do solo e o equacionamento da vazão mássica.
- O quarto capítulo mostra o material e métodos aplicados: construção da bancada; componentes eletrônicos com suas principais características; determinação da fertilidade do solo; avaliação da dosagem teórica do dosador; conversão da rotação do dosador em vazão mássica e a simulação computacional.
- O quinto capítulo apresenta os resultados e discussão: análise dos parâmetros iniciais; verificação da vazão mássica real do dosador; aferição inicial do motor; efeito da transmissão; avaliação do torque do motor; teste de frequência do (PWM) do motor e a comparação da vazão mássica (Teórica e Real).
- No sexto capítulo são expostas as conclusões.
- No sétimo capítulo são elencadas as sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. AGRICULTURA DE PRECISÃO

Antes mesmo da revolução industrial e do processo de mecanização da atividade agrícola, os agricultores já se mostravam capazes de reconhecer a variabilidade espacial de certas características físico-químicas e biológicas das áreas cultivadas. A própria divisão dessas áreas em talhões reflete essa capacidade de discernimento. Até então, o uso de trabalho braçal e tração animal permitia aos agricultores tratar áreas com menor ou maior fertilidade ou com infestação de pragas, doenças e plantas daninhas de forma diferenciada (Fraisie & Faoro, 1998).

Os fundamentos da AP moderna surgiram em 1929, nos Estados Unidos da América, e foram descritos por Linsley e Bauer na circular n-346 da Estação Experimental Agrícola da Universidade de Illinois (Goering, 1993). Nessa época, os autores haviam constatado a existência de grandes variações quanto à necessidade de calagem em determinada área e que a aplicação de calcário deveria respeitar essa variabilidade. Essa filosofia, entretanto, foi preterida em virtude do desenvolvimento de equipamentos de tração mecânica que facilitaram a aplicação de insumos em taxas uniformes. O ressurgimento e disseminação da AP, na forma em que hoje é conhecida, ocorreram somente em 1980, quando microcomputadores, sensores e sistemas de rastreamento terrestres ou via satélite foram disponibilizados e possibilitaram a difusão das técnicas (Balastreire, 1998).

Os avanços iniciais nessa área foram subsidiados pela disponibilização de sistemas de posicionamento global por satélites para a localização de pontos na superfície terrestre. A partir daí, foram criadas varias ferramentas, como Sistemas de Informações Geográficas (SIG ou GIS), sensoriamento remoto, tecnologias de aplicação em taxas variáveis (VRT - *Variable-Rate Technology*), sensores, monitores de colheita, entre outras, que auxiliaram na identificação e no manejo da variabilidade de áreas agrícolas.

Os conceitos de agricultura de precisão têm despertado grande interesse e são considerados por alguns autores como a “terceira onda” na agricultura, sendo a mecanização com tração animal, a primeira, e a com equipamentos motorizados, a segunda (Balastreire, 2000).

Para Molin (2001), uma definição mais atual de AP com visão sistêmica do conjunto de ações que a compõe pode ser seguida: a AP seria, acima de tudo, um sistema de gestão ou de

gerenciamento da produção agrícola que aproveita um conjunto de tecnologias e procedimentos para que as lavouras e sistemas de produção sejam otimizados, tendo como elemento chave o manejo da variabilidade da produção e dos fatores envolvidos.

A proposta da AP é permitir que se faça tudo que o pequeno produtor sempre fez porém, em maior escala e associando todo o conhecimento acumulado pelas ciências agrárias até os dias de hoje (Molin, 2002).

A agricultura vem passando por uma série de transformações importantes, com a atividade cada vez mais competitiva e exigindo do produtor rural um maior nível de conhecimento, capacidade de gerenciamento e profissionalismo. De acordo com Pires *et al.* (2004), a viabilização da atividade, com a obtenção de lucro satisfatório, está sempre em risco em decorrência de fatores controláveis e incontroláveis que definem a produção agrícola; portanto, a aplicação dos recursos disponíveis de forma eficiente é indispensável como garantia de sucesso.

Segundo Luz *et al.* (2010), o sistema de aplicação de corretivos que predomina no Brasil é o convencional, ou seja, trabalha-se com uma condição representativa da fertilidade do solo, que gera uma recomendação constante para a área. Dessa forma a aplicação é realizada a taxas fixas, o que representa a técnica de adubação pela média. Sabe-se que o solo é, por natureza, variável em seus atributos químicos e físicos e a aplicação de corretivo a taxa fixa não leva em consideração essa variabilidade; desta forma, ocasionará um erro na dosagem adequada do corretivo no local do terreno.

Quando se fala da agricultura tradicionalmente realizada no passado, o que se evidencia é uma prática de relação íntima com a terra, onde o produtor conhecendo cada palmo da propriedade tenta fazer a AP de maneira rudimentar, ou seja, sem saber qual a real necessidade do solo e sem dispor de equipamentos para tal.

A solução que vem sendo utilizada é a de focar grandes áreas e entendê-las como homogêneas, levando ao conceito da necessidade média para a aplicação dos insumos – fertilizantes e defensivos. Isso faz com que, por exemplo, a mesma formulação ou quantidade do fertilizante seja utilizada para toda a área, atendendo apenas as necessidades médias e não considerando, desta forma, as necessidades específicas de cada parte do campo. O mesmo acontece para os demais insumos, causando como resultado uma lavoura com produtividade não uniforme (Capelli, 1999).

Na grande maioria dos setores agrícolas o que se tem hoje é outra realidade, a exigir novas práticas. Trata-se de um cenário diferente do universo da agricultura tradicional, não apenas constituído de pequenas glebas, mas de grandes extensões de terra que requerem novos planos de ação. A agricultura de precisão se insere neste contexto como uma proposta

de tornar possível a realização de ações localizadas como nos processos agrícolas tradicionais do antigo e pequeno agricultor, diante dos desafios da agricultura em larga escala (Silva, 2009).

Como se pode observar na Figura 1, o ciclo completo da AP mostra a preocupação com o preparo do solo, plantio, acompanhamento da lavoura e colheita. Citando as seguintes técnicas: geração dos mapas de colheita, amostragem sistêmica do solo, análise do conjunto de dados, interpretação das informações contidas nos mapas, medidas de correção da variabilidade e acompanhamento da lavoura.



Figura 1 - Ciclo da AP.
Fonte: Molin, (2008).

A variabilidade dos fatores de produção está associada a múltiplas causas, desde a variabilidade climática até a representada pelo ambiente em torno de uma única semente (solo, oxigênio, disponibilidade de água, nutrientes, etc.) que é depositada no solo.

Entretanto, as formas de variabilidade que estão sendo estudadas e manejadas em AP podem ser classificadas em “Variabilidade Espacial” (aquela que ocorre com um atributo na área, por exemplo: variação da concentração de fósforo no solo em uma área de 20 hectares), “Variabilidade Temporal” (aquela que ocorre ao longo do tempo, por exemplo: disponibilidade de água no solo em função da sazonalidade da precipitação pluvial) e uma terceira (que representa a ação do homem nas duas primeiras), chamada “Variabilidade Induzida pelo Manejo” (aquela criada pelas decisões de manejo tomadas nas áreas de cultivo, por exemplo: alocação de culturas e regulagem de máquinas). Esta última ocorre, por

exemplo, quando há máquinas desgastadas e desreguladas, sistemas de cultivo diferenciados, partes da lavoura deixadas em descanso por vários anos e deficiência no controle de plantas daninhas (Farnham, 2000).

Neste contexto, a AP apresenta-se como uma moderna ferramenta para auxiliar o produtor na definição das melhores estratégias de manejo a serem adotadas, visando aumentar a eficiência da atividade agrícola. Especificamente, no manejo do solo, a AP tem como principal conceito aplicar no local correto (espaço), no momento adequado (tempo), as quantidades de insumos necessários (quantidade) à produção agrícola, para áreas cada vez menores e mais homogêneas, tanto quanto a tecnologia e os custos envolvidos o permitam (Dodermann & Ping, 2004).

A variabilidade espacial nas lavouras brasileiras não é nenhuma novidade. Em conversa com produtores e técnicos de campo percebe-se o reconhecimento dessa natureza, reafirmando que uma parte da área produz mais que a outra ou, que em determinado local, os teores de nutrientes são mais elevados que a média da lavoura. A valorização da variabilidade espacial e a possibilidade de manejá-la visando aumentar a eficiência do uso de insumos tem sido um desafio para técnicos e produtores. As novas ferramentas da tecnologia da AP vêm sendo incorporadas como meio de gerenciar a variabilidade de atributos de solo na propriedade e subsidiar o aprimoramento do manejo do solo e das culturas. O aumento na eficiência dá-se com base no manejo diferenciado, respeitando a variabilidade existente na área. A integração da computação e da eletrônica são os meios de se elevar os níveis de controle e monitoramento da atividade agrícola em locais específicos da lavoura. Através de análise detalhada das lavouras e do aprimoramento das técnicas de manejo, novos níveis de eficiência qualitativos e quantitativos da produção das culturas podem ser alcançados sucessivamente (Santi *et al.*, 2009).

Atualmente as máquinas que têm o propósito de fazer adubação na linha de plantio o fazem com adubos pré-formulados, ou seja, com uma mistura de proporções já definidas dos macros elementos (Nitrogênio, Fósforo e Potássio), fazendo assim com que elemento que já existe no solo seja depositado novamente sem a necessidade prévia do mesmo, causando, portanto um aumento no custo de plantio e o desperdício de fertilizante químico. Portanto a proposta deste trabalho é fazer a formulação, dosagem e aplicação localizada no momento do plantio, ou seja, depositar no local desejado somente os elementos necessários e na quantidade requerida pela planta numa única operação. O tipo de distribuição de fertilizante utilizada será simultaneamente a implantação da cultura usando uma adubadora-semeadora para o plantio direto, pois essa máquina executa na mesma operação o plantio e a adubação.

Segundo Blackmore *et al.* (2007), um grande número de conceitos tradicionais de produção de plantas está sendo reconsiderado à luz do desenvolvimento de máquinas inteligentes. O conceito de plantar em linhas, que requer um tipo mais simples de máquina, as sementes são colocadas ao longo de cada linha. Se a localização de cada semente é conhecida e a posição de cada planta cultivada é estimada, podemos identificar cada planta pela sua localização espacial. Melhor informação sobre as características da planta permite uma melhor gestão e tomada de decisão, que por sua vez traz uma série de melhorias que podem aumentar a eficiência geral da produção agrícola.

Conforme Umezu (2003), o termo agricultura de precisão AP é utilizado para descrever o uso de diversas tecnologias avançadas, buscando-se a redução dos custos de produção, cuja preocupação diz respeito à preservação do meio ambiente. Conforme diversos autores, a agricultura de precisão pode ser dividida em três grandes etapas: na coleta de dados, com o objetivo de mapear a variabilidade espacial e temporal do campo; na análise de dados e tomada de decisões e na aplicação localizada de insumos agrícolas. As etapas da agricultura de precisão constituem um ciclo que é repetido a cada safra. Para completar o ciclo da agricultura de precisão são necessários equipamentos com capacidade de aplicar, de forma precisa, insumos a taxas variáveis.

2.2.TECNOLOGIA DE APLICAÇÃO VARIÁVEL

Com o avanço da Agricultura de Precisão a tecnologia “Taxa Variável” se tornou indispensável, não só pelo fato da correção da fertilização, mas também na pulverização e plantio. Partindo do pressuposto que cada pequena parte da lavoura receberá a quantidade de produto ou insumo que necessita e não mais na quantidade média de uma área como ocorre na agricultura convencional. A agricultura de precisão vem sendo objeto de muitos estudos para o desenvolvimento de novas tecnologias que permitam aumentar a qualidade, operacional e a redução de custos dos equipamentos de taxa variável. O conjunto é composto por GPS para localização, computador e software para ler a recomendação e gravar os dados da operação, sensores de monitoramento e motores elétricos ou hidráulicos para o processo mecânico de variação da rotação desses em tempo real.

A aplicação localizada de fertilizantes ou insumos compreende três etapas: coleta de dados, interpretação dos mapas e aplicação localizada. No caso de fertilizantes e corretivos, por exemplo, começa-se pelo mapeamento dos fatores ligados à cultura e ao solo. Nesta etapa são utilizadas colhedoras equipadas com sistemas de posicionamento global (GPS) e monitores de produção, além de equipamentos para coleta de amostras de solo georreferenciadas. A seguir utilizando-se sistemas de informações geográficas (SIG) e

conceitos geoestatísticos, tais informações são transformadas em mapas de atributos, os quais fornecem uma visualização espacial do desempenho do sistema produtivo. Na segunda etapa ocorre o planejamento da aplicação dos insumos, baseando-se na interpretação dos mapas de atributos. Nesta fase, torna-se muito importante a análise da evolução e do comportamento desses fatores ao longo do tempo, além do profundo conhecimento agrônomo para recomendações de aplicação. Tal planejamento resulta nos mapas de aplicação, os quais serão interpretados pelos controladores eletrônicos das máquinas de aplicação na terceira fase. Durante a aplicação, o GPS fornece a posição das máquinas no campo e, de acordo com os mapas de aplicação, as mesmas aplicam somente as quantidades necessárias, nos locais planejados (Antuniassi, 1999).

Existem várias possibilidades para a aplicação em taxa variável, que incluem os principais nutrientes de plantas (N, P e K), calcário, sementes, genótipos, agroquímicos, água e práticas de manejo do solo. Para cada insumo, deve ser desenvolvida uma estratégia para guiar com precisão a aplicação variável (Doerge, 2000).

Para Werner *et al.* (2007) a variação da taxa de deposição de fertilizante pode se dar também através da variação da velocidade de deslocamento da máquina, ou seja, de forma direta sem muito aparato eletrônico computacional.

Com o mapa de aplicação de fertilizantes gerado por softwares específicos e com o auxílio do GPS de alta precisão todos interligados a um computador de bordo e inseridos na máquina, a mesma aplica o fertilizante em quantidades variáveis ou fixas, obedecendo à análise prévia de fertilidade do solo processada anteriormente (Fresco, 1995).

Existem duas abordagens para se fazer aplicações de fertilizantes em taxas variáveis, uma delas está baseada em mapas e outra em aplicação em tempo real. A aplicação em tempo real geralmente depende de sensores embarcados em máquinas que, conforme as necessidades da cultura fazem a aplicação do fertilizante na mesma operação como ilustra a Figura 2. A vantagem deste sistema é a rapidez de diagnóstico e a possibilidade de realizar a aplicação em grandes áreas (Shiratsuchi *et al.*, 2007).

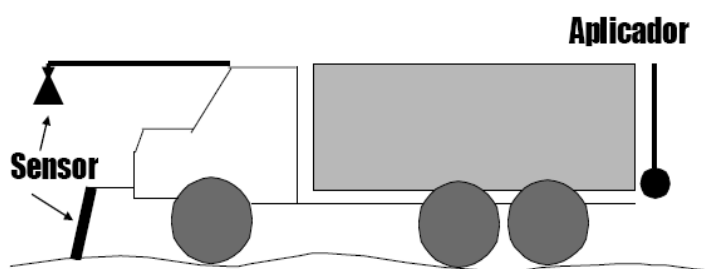


Figura 2 - Aplicação On-Line.
Fonte: Molin, (2008).

A outra abordagem está embasada na aplicação de fertilizantes de acordo com um mapeamento prévio do fator que interfere na produtividade. A principal vantagem da aplicação localizada de fertilizantes baseados em mapas pré-elaborados é a possibilidade de intervenção do técnico previamente à operação agrícola como ilustra a Figura 3. Ao contrário da aplicação em tempo real, onde a diagnose é feita por meio de softwares de tomada de decisão. A precisão dessa abordagem irá sempre depender da densidade de pontos amostrais (Shiratsuchi *et al.*, 2007).

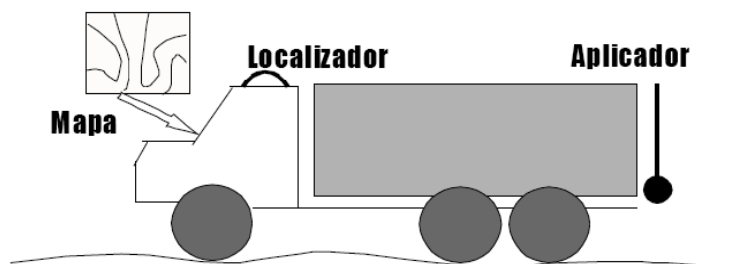


Figura 3 - Aplicação Off-Line.
Fonte: Molin, (2008).

Segundo Molin (2008), num futuro próximo uma adequação dessas duas abordagens anteriormente mencionadas parecem ser a melhor opção, pois a interação entre as informações prévias e os dados colhidos em tempo real deve aprimorar a característica das intervenções localizadas no campo.

Historicamente os métodos de taxa variável foram introduzidos pela indústria nos EUA em meados dos anos 1980. O nitrogênio, fósforo e o potássio tinham sua taxa de aplicação variada em aplicadores comerciais, com a quantidade baseada em um levantamento prévio. Esse mapeamento era, e ainda é feito com amostra de partes do solo e posterior interpolação dos dados. As máquinas eram equipadas com (VRT - *Variable-Rate Technology*) para controlarem a quantidade de insumos que eram depositados. Existe uma pequena variação no uso de VRTs para corretivos e agrotóxicos. No caso dos corretivos o levantamento do solo é essencial, já para os agrotóxicos pode-se optar por sistemas de visão em tempo real.

Para Serrano *et al.* (2007), a aplicação de fertilizantes representa uma incumbência importante na manutenção das culturas. Exige-se, por isso, a avaliação rigorosa dos equipamentos de forma a cumprir os planos de recomendação para cada gleba. O levantamento preciso das glebas, o apoio à tomada de decisão, o estudo agrônomo de cada caso e a aplicação diferenciada dos fatores de produção constituem etapas deste novo conceito de agricultura e representam um campo ambicioso e com grande potencial.

Os custos para automatizar este sistema não são proibitivos, porém deve-se atentar para a gama de funções que podem ser requisitadas. Basicamente os VRTs representam uma

interface entre hardware e software, porém este conjunto deve ser capaz de receber e processar os dados vindos do sistema GPS, integrando com as informações mapeadas. Os requisitos podem então crescer conforme o grau de sofisticação e complexidade do sistema. Podem ser incorporados múltiplos insumos, para casos de aplicação de mais um tipo de agrotóxico. Além de todas essas variações, os custos devem ser levantados considerando o custo para o mapeamento do solo, treinamento do pessoal de operação e ainda custo de desenvolvimento de novas tecnologias, quando necessário.

Segundo Scarlett (2001), a implantação de sistemas de controle para a automação pode gerar um incremento de 15 a 20% na eficiência de operação do trator agrícola. Além da maior eficiência na operação mecânica, a implantação de sistemas de controle ajuda a reduzir o esforço mental do operador, diminuindo sua fadiga e aumentando seu rendimento e qualidade de trabalho.

2.3. MÁQUINAS PARA APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES MINERAIS SÓLIDOS

Aplicar corretamente os fertilizantes é fundamental para determinar o máximo aproveitamento pelas plantas e os melhores resultados econômicos. Para isso, é necessário colocar a maior quantidade possível do fertilizante à disposição das raízes, minimizando perdas e evitando danos ao meio ambiente.

A maioria dos fertilizantes minerais é constituída de sais solúveis, que são arrastados pelas águas, tanto vertical como lateralmente. Apesar do movimento horizontal ser bem menor, a erosão de superfície é significativa, e precisa ser evitada. Nitratos demonstram maior mobilidade, enquanto sais potássicos e amoniacais são menos móveis e fosfatos praticamente imóveis dependendo da porosidade e composição do solo, da intensidade das chuvas, etc. Por outro lado, concentração salina exagerada prejudica a germinação e desidrata plantas recém-germinadas, dependendo da posição, distância e tipo de sais do fertilizante (Fertiza, 1996).

Conforme a Anda (2000), a adubação com fertilizantes minerais é uma prática indispensável na agricultura moderna. Isso porque é a forma mais rápida e eficiente – e de menor custo operacional - para melhorar as características químicas do solo, principalmente no que se refere ao aumento de disponibilidade de nutrientes para as plantas cultivadas. A aplicação mecanizada de corretivos tem como fatores limitantes as características físicas do produto, principalmente no que se refere à sua granulometria e teor de água. Assim sendo, quanto menor o tamanho das partículas, e quanto mais úmido o produto, maior dificuldade as máquinas aplicadoras encontram para dosar e distribuir adequadamente o mesmo. Via de

regra, esses corretivos são aplicados a lanço, por meio de distribuidores tratorizados, conforme ilustra a Figura 4.



Figura 4 - Aplicação de Fertilizante a Lanço.
Fonte: Molin, (2008).

A aplicação a lanço geralmente é empregada nas correções dos solos, adubos orgânicos e outros casos de aplicação em área total, como as culturas perenes totalmente desenvolvidas. Há máquinas variadas, de arraste ou ligadas a tomada de força do trator; com dosadores gravimétricos ou volumétricos, distribuidor por queda livre, centrífuga ou pendular, etc.

De uma maneira geral, pode-se conceber três épocas distintas de adubação: Antes da implantação da cultura, simultaneamente à implantação da cultura e após a implantação da cultura.

1. Adubação antes da implantação da cultura também conhecida por adubação de fundação, é uma prática usual em culturas perenes ou semi-perenes, normalmente característica de plantas com princípio de propagação vegetativa como mudas, colmos, bulbos e tubérculos. Nesse caso, normalmente a unidade adubadora é associada a um implemento sulcador e, portanto, por ocasião da sulcação é realizada a adubação principalmente de fósforo e de potássio. Outra variável é quando a cultura é implantada em covas, e, nesse caso a adubação pode ser realizada inclusive manualmente. Os exemplos mais característicos dessas duas variáveis são a lavoura cafeeira mais tradicional e a cultura da cana-de-açúcar. A Figura 5 mostra a configuração típica de máquina adubadora associada a um Implemento sulcador.



Figura 5 - Implemento Sulcador Adubador
Fonte: Molin, (2008).

2. Adubação simultânea à implantação da cultura, também conhecida como adubação de semeadura é característica de culturas anuais. Dessa forma, a unidade adubadora é associada à unidade semeadora, tanto no caso de semeadoras para sementes miúdas (trigo, aveia, cevada, centeio e forragens em geral), como no caso de semeadoras para sementes graúdas (milho, soja, feijão, algodão, girassol e outras). Os exemplos mais característicos de lavouras onde ocorre esse tipo de adubação são as culturas produtoras de grãos e algumas forrageiras, e os adubos mais utilizados nesse caso são as formulações N-P-K convencionais. A Figura 6 mostra a configuração típica de uma máquina adubadora-semeadora.



Figura 6 - Máquina Adubadora-Semeadora.
Fonte: John Deere (2009).

Especialmente projetadas para culturas anuais são máquinas modernas de linhas múltiplas e associadas às semeadoras, sulcam e distribuem o adubo logo abaixo da semente, fazem outro sulco ao lado menos profundo para distribuição da semente e cobrem com terra, como ilustra a Figura 7.

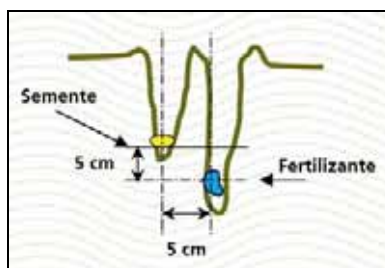


Figura 7 - Esquema da Aplicação do Fertilizante no Momento da Semeadura.
Fonte: Serrana (2004).

3. Adubação após a implantação da cultura, esse tipo de fertilização pode ser utilizado em culturas perenes, como em culturas anuais. Nas culturas perenes, normalmente está relacionada com as adubações de manutenção da planta. Nas culturas anuais é quase que específica para as adubações nitrogenadas, embora, mais recentemente, também sejam utilizadas adubações potássicas. Em ambos os casos é conhecida como adubação de cobertura. Como as perdas, principalmente por volatilização são relativamente elevadas em adubos nitrogenados, às máquinas mais modernas visam à introdução do fertilizante em linhas e incorporado ao solo, e não simplesmente depositado na superfície. A aplicação do fertilizante em cobertura deve ser feita quando a cultura tem necessidade desse nutriente e quando possui raízes bem desenvolvidas. Outro cuidado é que o solo não deve estar muito seco nem muito encharcado. Se a adubação for feita em uma planta que ainda não tem muitas raízes, a primeira chuva que cair, irá provocar a perda de nutrientes. Porém se a aplicação for feita com a planta bem enraizada, os nutrientes serão absorvidos, evitando assim a sua perda. Nos solos arenosos, é bom parcelar em mais vezes, a aplicação de adubos, devido a pouca retenção dos nutrientes neste tipo de solo. A Figura 8 mostra a configuração típica de uma máquina Cultivadora Adubadora.



Figura 8 - Cultivador Adubador com Cobertura.
Fonte: Marchesan (2009).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. SISTEMA DE CONTROLE E AQUISIÇÃO DE DADOS

Foram utilizados um controle em malha aberta e um controle em malha fechada com realimentação. O controle em malha aberta consiste em aplicar um sinal de controle pré-determinado, esperando-se que ao final de um determinado tempo a variável controlada atinja um determinado valor ou apresente um determinado comportamento. Neste tipo de sistema de controle não são utilizadas informações sobre evolução do processo para determinar o sinal de controle a ser aplicado em um determinado instante. Mais especificamente, o sinal de controle não é calculado a partir de uma medição do sinal de saída. As características básicas de um sistema de controle que opera em malha aberta: imprecisão, nenhuma adaptação a variações externas (perturbações), dependência do julgamento e da estimativa humana. Por outro lado, estes tipos de sistemas são em geral simples e baratos, pois não envolvem equipamentos sofisticados para a medição e/ou determinação do sinal de controle.

No controle em malha fechada, as informações sobre como a saída de controle está evoluindo são utilizadas para determinar o sinal de controle que deve ser aplicado ao processo em um instante específico. Isto é feito a partir de uma realimentação da saída para a entrada. Em geral, a fim de tornar o sistema mais preciso e de fazer com que ele reaja a perturbações externas, o sinal de saída é comparado com um sinal de referência e o desvio entre estes dois sinais é utilizado para determinar o sinal de controle que deve efetivamente ser aplicado ao processo. Assim, o sinal de controle é determinado de forma a corrigir este desvio entre a saída e o sinal de referência. O dispositivo que utiliza o sinal de erro para determinar ou calcular o sinal de controle a ser aplicado à planta é chamado de controlador ou compensador. Em resumo, a utilização da realimentação e, portanto, do controle em malha fechada, permite entre outros: aumentar a precisão do sistema; rejeitar o efeito de perturbações externas; melhorar a dinâmica do sistema e, eventualmente, estabilizar um sistema naturalmente instável em malha aberta; diminuir a sensibilidade do sistema a variações dos parâmetros do processo, ou seja, tornar o sistema mais robusto.

Paralelamente para realização do experimento com os três motores seria necessária uma placa de aquisição que suportasse a utilização de seis contadores ao mesmo tempo, como isso não foi possível, pois a placa utilizada só aceitou dois contadores, optou-se por fazer o ensaio

com apenas um motor, porém como todos os motores são iguais, alimentados pela mesma tensão e utilizam a mesma placa de aquisição, acredita-se que o comportamento seja o mesmo para os três motores.

3.1.1. Sistema de Controle em Malha Aberta

Segundo Ogata (2003), são sistemas nos quais o sinal de saída não afeta a ação de controle, ou seja, num sistema de controle a malha aberta, não se mede o sinal de saída e tampouco este sinal é enviado de volta para comparação com o sinal de entrada. Assim a cada sinal de referência na entrada corresponde uma condição de operação fixa, como resultado, a exatidão do sistema depende de uma calibração, na presença de distúrbios não desempenham a tarefa desejada. Na prática, são usados somente quando as relações entre entrada e saída do processo a controlar forem conhecidas e quando não existirem distúrbios internos e externos.

Segundo Umezu & Cappelli (2006), sistemas de controle têm sido cada vez mais utilizados em máquinas e equipamentos agrícolas. É comum se encontrar tratores e colhedoras agrícolas equipados com diversos sistemas automáticos para controle de tarefas que, tradicionalmente, eram realizadas pelo próprio operador da máquina.

Segundo Tabile *et al.* (2011), o motor de corrente contínua escovado é o mais indicado para o uso em equipamentos agrícolas, pois é o de maior confiabilidade, menor custo e de controle de velocidade mais simples, que torna uma solução flexível e fácil de instalar. A energia de alimentação pode ser fornecida por bateria e amplificadores de potência, e deve ser capaz de conduzir os componentes eletrônicos e o computador.

No primeiro ensaio, o tipo de controle utilizado foi em malha aberta, pois é mais simples e de fácil manuseio, permite a interferência do controlador com controle manual. Esse tipo de controle não necessita de sensores de movimento pelo fato de ser um controle de malha aberta. O controle de malha aberta não usa a realimentação dos motores é um sistema de controle que manda a informação para o motor e não tem a preocupação em saber se o motor está ou não funcionando adequadamente, portanto deve-se estabelecer uma relação de confiança para com o sistema. Nesse ensaio foram utilizados dois motores variando a rotação e um motor de rotação fixa, conforme ilustra o diagrama de blocos e o painel de controle das Figuras 9 e 10, respectivamente.

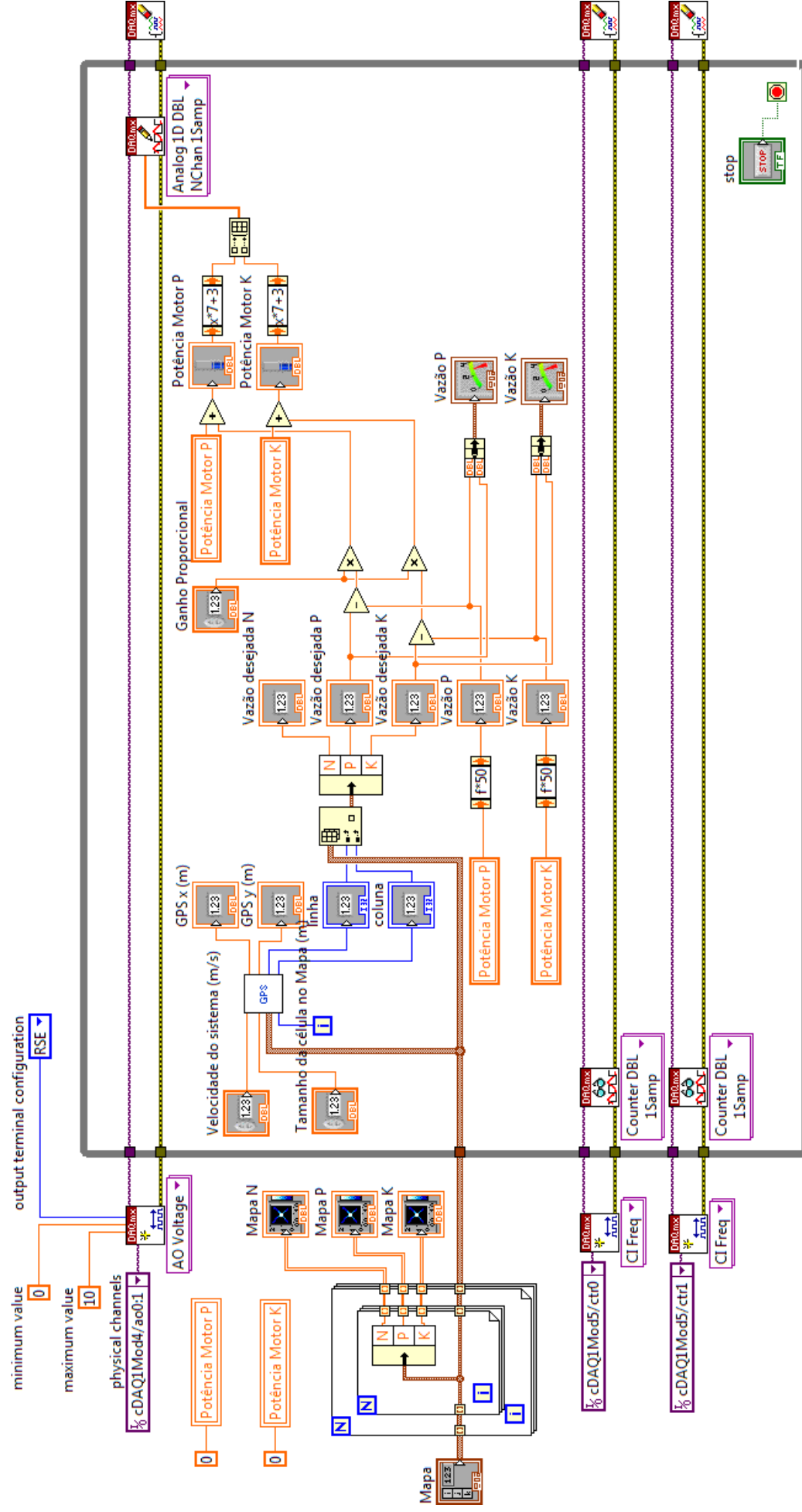


Figura 9 - Diagrama de Blocos (Malha Aberta).

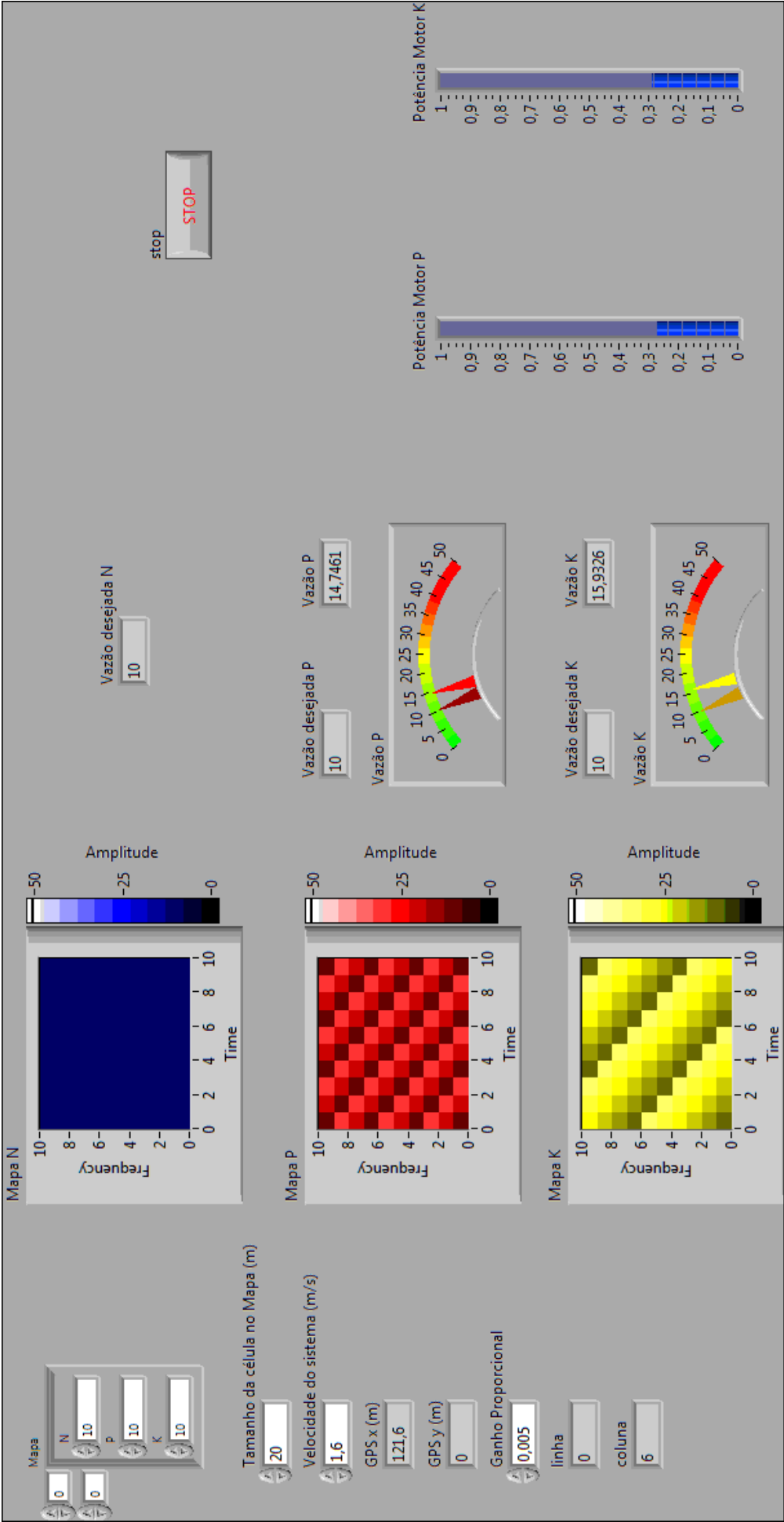


Figura 10 - Painel de Controle (Malha Aberta).

3.1.2. Sistema de Controle em Malha Fechada

No segundo ensaio utilizou-se o controle do tipo PID (Proporcional + Integral + Derivativo), usado em sistemas de malha fechada. Esse controle leva em consideração o comportamento da rotação do motor, se preocupando com o que ocorre com o mesmo em funcionamento e para isso é imprescindível o uso de um sensor de movimento. Neste caso, utilizou-se um (ENCODER), cuja função é medir a frequência através da rotação do eixo do motor e com essa realimentação a rotação do motor se ajusta, de acordo com a necessidade de referência, conforme ilustra o diagrama da Figura 11.

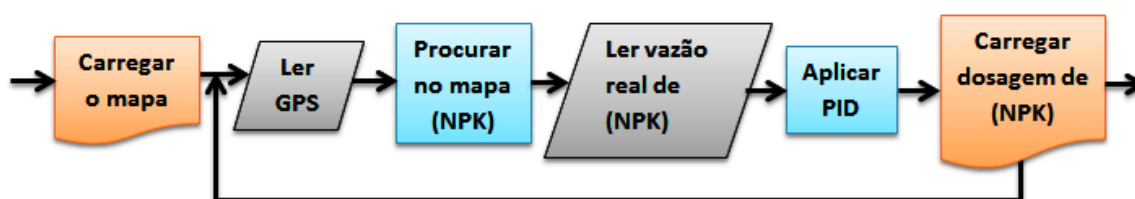


Figura 11 - Diagrama do Controle Realimentado.

Fonte: Autoria própria.

Em geral, a fim de tornar o sistema mais preciso e de fazer com que ele reaja a perturbações externas, o sinal de saída é comparado com um sinal de referência e o desvio entre estes dois sinais é utilizado para determinar o sinal de controle que deve efetivamente ser aplicado ao processo. Assim, o sinal de controle é determinado de forma a corrigir este desvio entre a saída e o sinal de referência. O dispositivo que utiliza o sinal de erro para determinar ou calcular o sinal de controle a ser aplicado à planta é chamado de controlador ou compensador.

Nesta simulação apenas um motor fará variação da rotação, por motivos descritos anteriormente. Escolheu-se a variação da vazão de Fósforo (P), aplicando o produto conforme a posição do GPS e na quantidade estabelecida pelo mapa de aplicação de fertilizantes já inseridas na matriz do programa. O dosador funciona mediante uma relação entre a vazão que está sendo lida no mapa e a vazão real que está sendo aplicado, o ajuste da rotação do motor faz com que a vazão seja corrigida, uma vez que a vazão é uma variável dependente da rotação. Tudo isso graças ao sensor de movimento (Encoder) que faz a leitura da rotação e envia o valor para o programa que faz a verificação, e numa fração de segundos reenvia para o motor corrigida. Com isso a rotação é aferida e mandada para a saída fazendo chegar mais próximo possível do valor de referência.

Segundo Ogata (2003), mais da metade dos controladores industriais em uso atualmente, emprega sistemas em PID; a utilidade dos controladores PID está na sua aplicabilidade na maioria dos sistemas de controle. Os controladores PID são muito utilizados nas indústrias para controle de nível de líquidos, temperatura, velocidade de rotação de motores, posicionamento mecânico em máquinas elétricas e controle de robôs.

Este trabalho vem corroborar com os estudos atuais sobre simulação dos processos e técnicas em AP de (Mello e Caimi, 2008) com o intuito de simular o comportamento do sistema de controle de fertilização, projeto e desenvolvimento de protótipo para ensaio em laboratório, com o intuito de minimizar os problemas de projeto e tempo de execução do produto final.

Segundo Molin (2004) somente a automatização dos sistemas de fertilização não é suficiente. Porquanto, existe a necessidade de todo um conjunto de sistemas interligados e interdependentes. Por isso, há época, muitos fabricantes americanos desse tipo de tecnologia não conseguiram permanecer no mercado de desenvolvimento de inovações de controle de fertilização do solo.

Para esta simulação construiu-se um mapa com células de 50 x 50m de acordo com as informações de referências do solo. Por tanto, utilizou-se o método de triangulação de Delaunay para criação da malha do mapa e suas respectivas coordenadas geográficas e dosagens de N, P e K. Isso foi feito para sincronizar o GPS da máquina com o sistema de controle de fertilização, havendo a necessidade da máquina se deslocar conforme as coordenadas geográficas pré-estabelecidas na matriz de programação. O deslocamento é demonstrado por um ponto (Preto) no mapa triangularizado, que pode ser visto na Figura 12, do painel de controle dando a exata posição da máquina no mapa, e ao mesmo tempo a vazão desejada e vazão real.

É importante ressaltar que o controle só acontece com a máquina nas limitações do mapa, ou seja, o equipamento só funcionará dentro do contorno da área a ser trabalhada e que o controle da máquina de arraste também é feito no painel de controle, onde aparece do lado direito da tela uma janela com o controle da velocidade, ainda com relação ao bom funcionamento do programa deve se ajustar manualmente os ganhos do controlador (derivativo - K_d , integral - K_i , proporcional - K_p), lembrando ainda que apenas um motor foi simulado, embora o programa esteja preparado para funcionar com três motores simultâneos.

A alteração na programação bem como a troca dos valores da frequência do PWM para os testes deverão ser feitas no diagrama de blocos do software, mostrado na Figura 13.

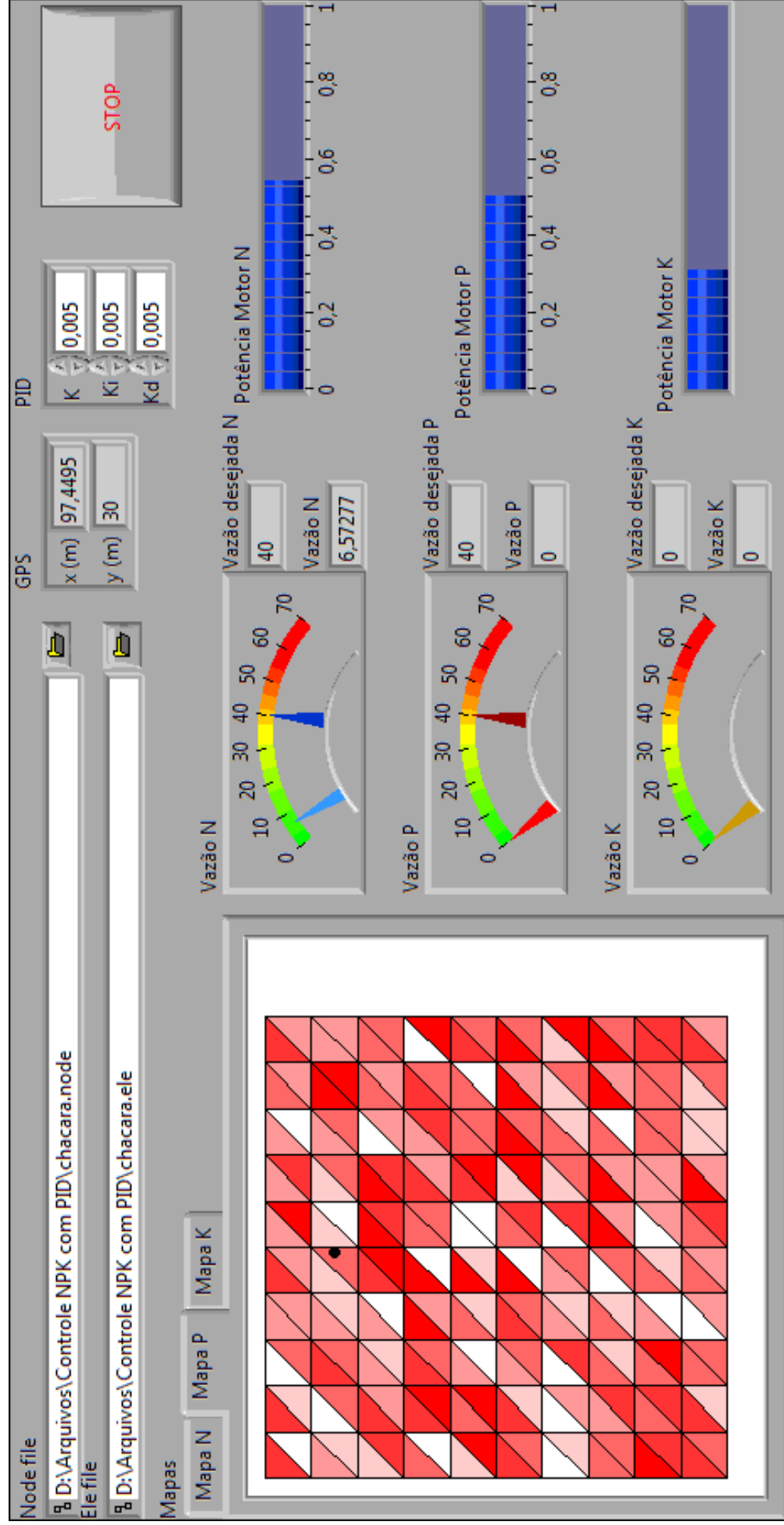


Figura 12 - Painel de Controle (Malha Fechada).

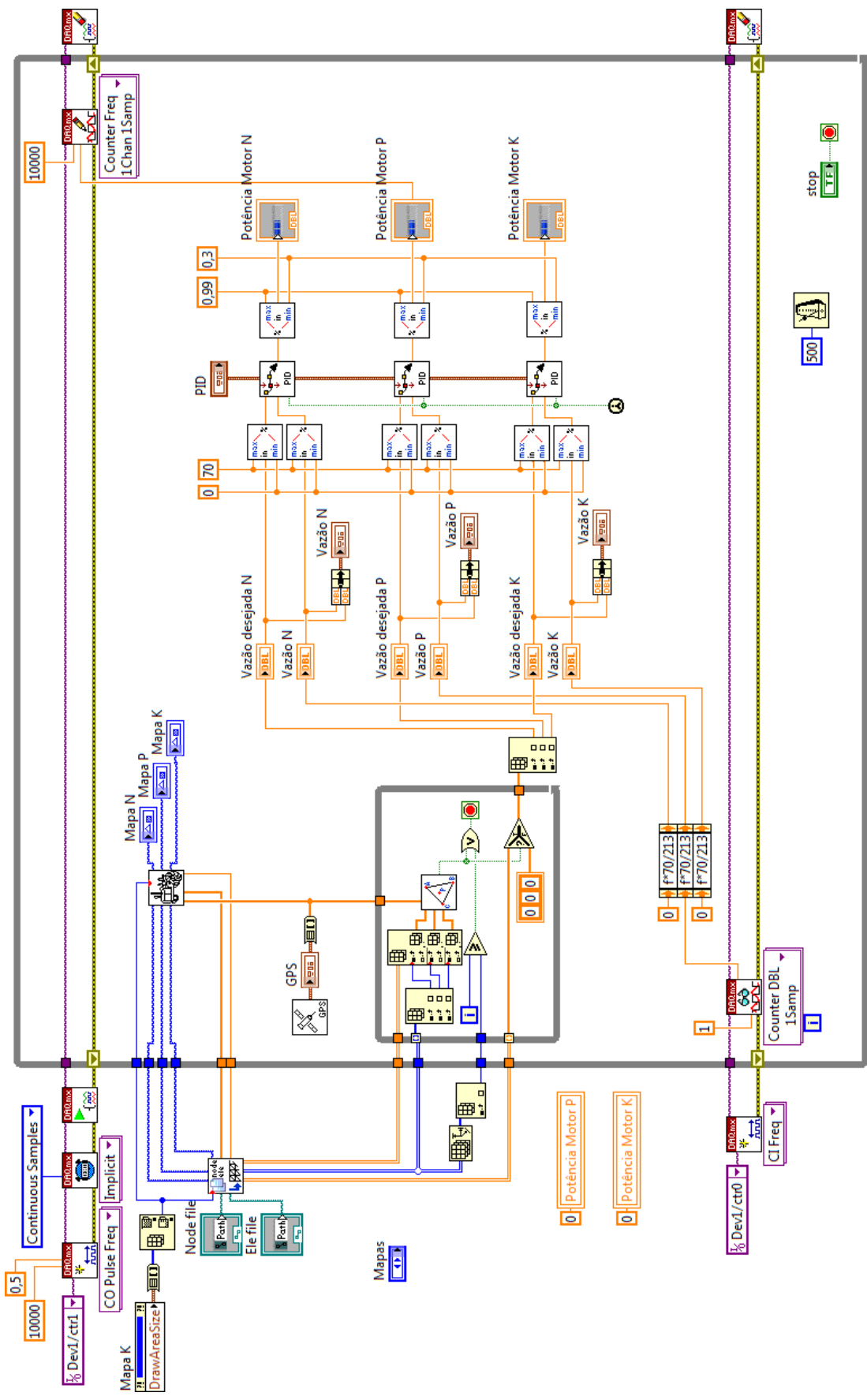


Figura 13 - Diagrama de Blocos (Malha Fechada).

3.2. MODULAÇÃO DE LARGURA DE PULSO (PWM)

O PWM é a abreviação de *Pulse Width Modulation* ou Modulação de Largura de Pulso. Para que se entenda como funciona esta tecnologia no controle de potência, partimos de um circuito imaginário formado por um interruptor de ação muito rápida e uma carga que deve ser controlada. Quando o interruptor está aberto não há corrente na carga e a potência aplicada é nula, no instante em que o interruptor é fechado, a carga recebe a tensão total da fonte e a potência aplicada é máxima. Como fazer para obter uma potência intermediária, digamos 50%, aplicada à carga? Uma ideia é fazermos com que a chave seja aberta e fechada rapidamente de modo a ficar 50% do tempo aberta e 50% fechada. Isso significa que, em média, teremos metade do tempo com corrente e metade do tempo sem corrente. A potência média é, portanto, a própria tensão média aplicada à carga é neste caso 50% da tensão de entrada. O interruptor fechado pode definir uma largura de pulso pelo tempo em que ele fica nesta condição, e um intervalo entre pulsos pelo tempo em que ele fica aberto, os dois tempos juntos definem o período e, portanto, uma frequência de controle. Variando-se a largura do pulso e também o intervalo de modo a termos ciclos ativos diferentes, podemos controlar a potência média aplicada a uma carga, assim, quando a largura do pulso varia de zero até o máximo, a potência também varia na mesma proporção. Este princípio é usado justamente no controle PWM: modulamos (variemos) a largura do pulso de modo a controlar o ciclo ativo do sinal aplicado a uma carga e, com isso, a potência aplicada a ela.

Na prática, substituímos o interruptor por algum dispositivo de estado sólido que possa abrir e fechar o circuito rapidamente como, por exemplo, um transistor bipolar, um FET de potência.

A modulação PWM, consiste basicamente em aplicar uma onda quadrada de amplitude V_{cc} e frequência alta (entre 10Khz e 20Khz) no lugar da tensão contínua (V_{cc}). A tensão média varia em função do tempo que a onda fica em nível alto (V_{cc}) e do tempo que a onda fica em nível baixo (0V). A relação entre o tempo que a onda fica em nível alto e o período total é conhecido como Duty Cycle. O Duty Cycle é normalmente expresso em percentual, ou seja, para uma modulação PWM com Duty Cycle igual a 50%, metade do tempo a tensão fica em nível alto (V_{cc}) e metade em nível baixo (0V). Uma modulação PWM de amplitude 12V e Duty Cycle de 50% produz o mesmo efeito de uma tensão contínua de amplitude 6V.

3.3. IDENTIFICAÇÃO DAS CARACTERÍSTICAS DO SOLO

Existem três maneiras de se gerar mapas de amostragem de solo: mapas de amostragem por pontos (pixel) normalmente gerados a partir de uma grade regular, mapas de amostragem por células e mapas de amostragem por isolinhas (vetorial).

Segundo Barbieri *et al.* (2008), os mapas para aplicação de insumos à taxa variada, elaborados por técnicas geoestatísticas, indicam maior eficiência para a aplicação de calcário, fósforo e potássio.

Segundo Fraisse & Faoro (1998), a variabilidade do solo no campo é um dos fatores mais importantes num programa de agricultura de precisão, pois influencia diretamente a disponibilidade de nutrientes. A maneira mais comum para amostragem do solo é o estabelecimento de uma rede de pontos (conhecida também como grid) espaçados regularmente no campo.

Para Sudduth (1999), o mapa de aplicação de insumos representa a interface entre o processamento de dados e o equipamento de aplicação. Um equipamento para aplicação de um único produto necessita apenas de um mapa de aplicação, porém, um equipamento para a aplicação de múltiplos produtos necessita de um conjunto de mapas de aplicação.

Conforme citado por Tschiedel & Ferreira (2002), a agricultura de precisão está se tornando cada vez mais comum nas propriedades rurais. As tecnologias existentes permitem que se adquira um grande conhecimento das variabilidades encontradas entre as diferentes áreas da propriedade, o que propicia a tomada de decisões com base em dados mais precisos. Com o advento deste conceito, ter-se-á um controle maior sobre as possíveis causas na redução da produtividade e dano ambiental.

Embora muitas das tecnologias da agricultura de precisão estejam relativamente maduras, continua havendo espaço para melhorias. Uma das mais importantes é o desenvolvimento de sensores locais ou proximais que podem ser utilizados em equipamentos agrícolas para determinar o estágio de colheita e condições de solo. Sistemas de detecção em propriedades de solo e nutrientes foram desenvolvidos e alguns deles têm sido implementados em tempo real para aplicações de nutrientes em taxas variáveis. No entanto, devido à grande variações nas propriedades do solo, muitos estudos sugerem a calibração desses sensores de solo, permanecendo como um desafio para a automatização do mapeamento das propriedades do solo em grandes áreas geográficas. Atualmente a agricultura de precisão é tecnicamente possível, mas requer um alto grau de conhecimento técnico e persistência do usuário final. As condições de cultura a campo são altamente variáveis, mas o futuro é promissor porque há

muitos investigadores que continuam tendo interesses em concentrar seus esforços em avanços tecnológicos (Lee *et al.*, 2010).

3.4. EQUACIONAMENTO DA VAZÃO MÁSSICA

O produto transportado pela rosca do helicoidal é considerado de fluxo constante, para cada volta do dosador a quantidade de fósforo aplicado será de 18,35gramas, para o trabalho adotou-se 18 gramas, todos os testes foram idealizados supondo-se a utilização de uma máquina adubadora-semeadora para plantio direto de milho.

Para a realização dos ensaios foram utilizados também: balança com precisão centesimal, termo higrômetro digital, um computador e todo aparato eletrônico para fazer o controle de rotação do motor, cronômetro para marcar o tempo de deposição de adubo em suas respectivas rotações. O tempo foi calculado pela equação (1), baseado na velocidade de 1,6 m/s, ou seja, 31,25 segundos que hipoteticamente é o tempo que a máquina leva para percorrer cinquenta metros (50 m), bem como foi utilizado cinco quilos (5 kg) de fertilizante (Fósforo), que foi reutilizado à medida que o sistema fazia a adubação experimental num depósito logo abaixo do dosador. Durante o teste da vazão mássica com o fertilizante foi monitorada a temperatura ambiente (21,9 °C), bem como a umidade relativa do ar (81,5%), uma vez que as mesmas interferem no manejo do fertilizante por causa da sua natureza higroscópica.

Para a velocidade de deslocamento da máquina adotou-se o valor de 1,6m/s, o que define a velocidade não é o sistema de fertilização e sim o sistema de plantio que não permite que se exceda esse valor, podendo ocasionar a má distribuição das sementes, segundo o manual de instruções do fabricante (Marchesan, 2008).

$$t = \frac{S}{v} \quad (1)$$

Onde:

- t = Tempo [s]
- S = Espaço a ser percorrido pela máquina para o teste de caída [m]
- v = Velocidade de deslocamento da máquina [m/s]

Para o cálculo da quantidade de fertilizante que será comparado com a quantidade real aplicado pelo dosador, foi utilizada a equação (2), onde será descrita a seguir:

$$q_S = \frac{e_L \cdot q_A}{A} S \quad (2)$$

Onde:

- A = Área a ser adubada [m^2]
- e_L = Espaçamento entre linhas da cultura [m]
- q_A = Quantidade de adubo a ser distribuída por hectare [Kg]
- S = Espaço a ser percorrido pela máquina para o teste de caída [m]
- q_S = Quantidade que deve cair em “S” [Kg]

Para suprir as necessidades de referências levantadas pelo mapa de aplicação de fertilizantes implica em variar a rotação do dosador. Para tanto, calcula-se os valores teóricos da vazão mássica na equação (3), para a quantidade desejada de fertilizante por área a ser trabalhada com o dosador girando a 1rpm, que para o cálculo é necessário determinar:

- Quanto o dosador aplica de fertilizante por rotação, para este trabalho foi 18 g/rpm;
- Quantidade de fertilizante por linha [$q_{F/L} = 18,75$ g/ linha de 100m];
- Quantidade de linhas.

$$q_L = \frac{W_A}{e_L}$$

$$q_{Fd} = \frac{q_{F/L} \cdot q_L}{1000} = \frac{q_{F/L} \cdot W_A}{1000 e_L} = 2,6786 \frac{kg}{rpm.ha} \quad (3)$$

Onde:

- q_L = quantidade de linhas;
- q_{Fd} = quantidade de fertilizante desejada para a área a ser fertilizada por rpm;
- $q_{F/L}$ = quantidade de fertilizante por linha;
- W_A = largura da área a ser fertilizada [m];
- e_L = espaçamento entre linhas [m].

4 MATERIAL E MÉTODOS

Para a análise do protótipo foi projetada e construída uma bancada de testes constituída de estrutura metálica de sustentação, moegas para armazenamento dos elementos químicos, dosadores, motores, mangueiras, coletor e um recipiente para receber a mistura dosada e formulada do fertilizante para aplicação, como mostra a Figura 14.

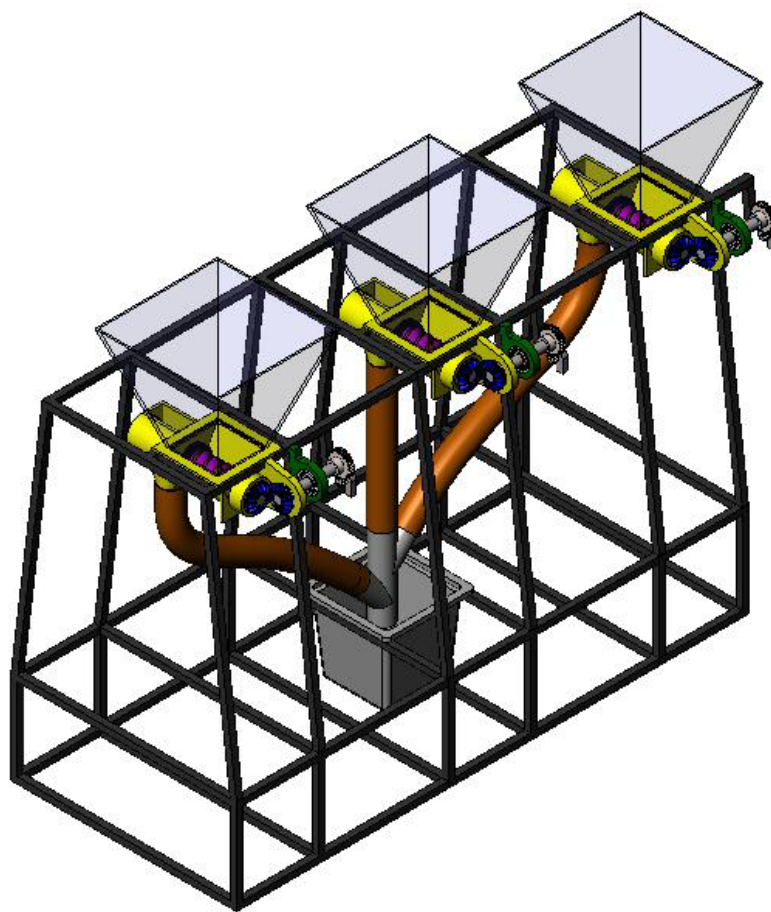


Figura 14 - Desenho em 3D da bancada de testes.

4.1. CONSTRUÇÃO DA BANCADA

A bancada de testes constitui-se dos seguintes componentes: estrutura metálica de sustentação, moegas para armazenamento, dosadores helicoidais, motores elétricos, mangueiras e coletor. A estrutura metálica tem a finalidade de suportar as moegas de armazenamento, os dosadores helicoidais, os motores, as mangueiras e coletor do protótipo,

confeccionada em aço carbono (metalon de 20 x 30mm) toda soldada, medindo 1,20m de comprimento por 0,45m de largura e 1,00m de altura, como mostra a Figura 15.

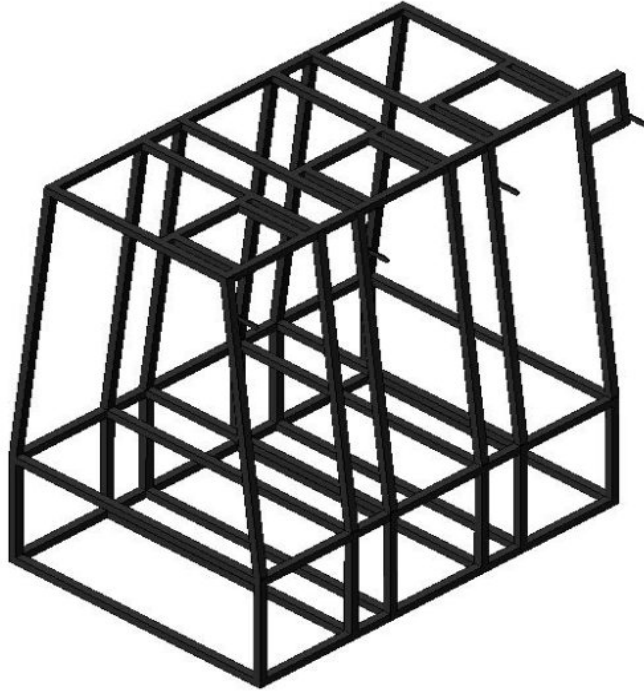


Figura 15 - Estrutura metálica.

A moega da (Figura 16) para armazenamento de fertilizante confeccionada em vidro de 8mm toda colada com cola siliconada especial para vidros, medindo 0,30m de comprimento por 0,30m de largura na parte superior por 0,30m de altura, de forma afunilada com abertura inferior de 0,08m por 0,08m, com um volume aproximado de $0,01\text{m}^3$, responsáveis pelo armazenamento do fertilizante que alimenta os dosadores.

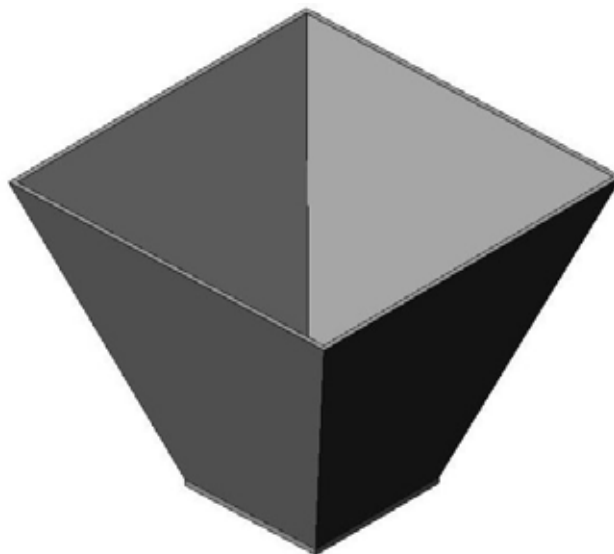


Figura 16 - Moega de armazenamento.

Os dosadores (Figura 17) utilizados no protótipo da marca (John Deere) são fabricados em polietileno de alta resistência e aço inox, materiais que resistem à corrosão dos elementos químicos, com rosca transportadora de aço carbono de 25,4mm de passe, totalmente desmontável para limpeza dos componentes internos e dispensa uso de ferramentas especiais; os dosadores são responsáveis pela variação da quantidade de fertilizante aplicado.



Figura 17 - Dosador helicoidal.
Fonte: John Deere.

Os motores (Figura 18) utilizados no protótipo são de baixa rotação e alto torque, de tamanho reduzido e baixo custo, de fabricação (PITTMAN), Cod. GM9514D006, 12 Vdc, corrente de trabalho é de 3,5A e com redução de 19,7 : 1 , esses motores podem variar a rotação através de um (PWM) conforme a necessidade desejada; essa variação de rotação representa uma variação na vazão mássica.



Figura 18 - Motor elétrico.
Fonte: Pittman.

As mangueiras utilizadas para o transporte do fertilizante são de borracha sanfonada de 50,8mm de diâmetro e 500mm de comprimento cuja função é levar até o coletor o elemento dosado. O coletor de PVC, também de 50,8mm tem como função receber o fertilizante vindo dos três dosadores e depositá-lo na linha de plantio. A Figura 19 mostra esquematicamente a estrutura do conjunto de cada elemento químico que são: (1) – Moegas, (2) – Dosadores, (3) – Motores, (4) – Mangueiras, (5) – Coletor.

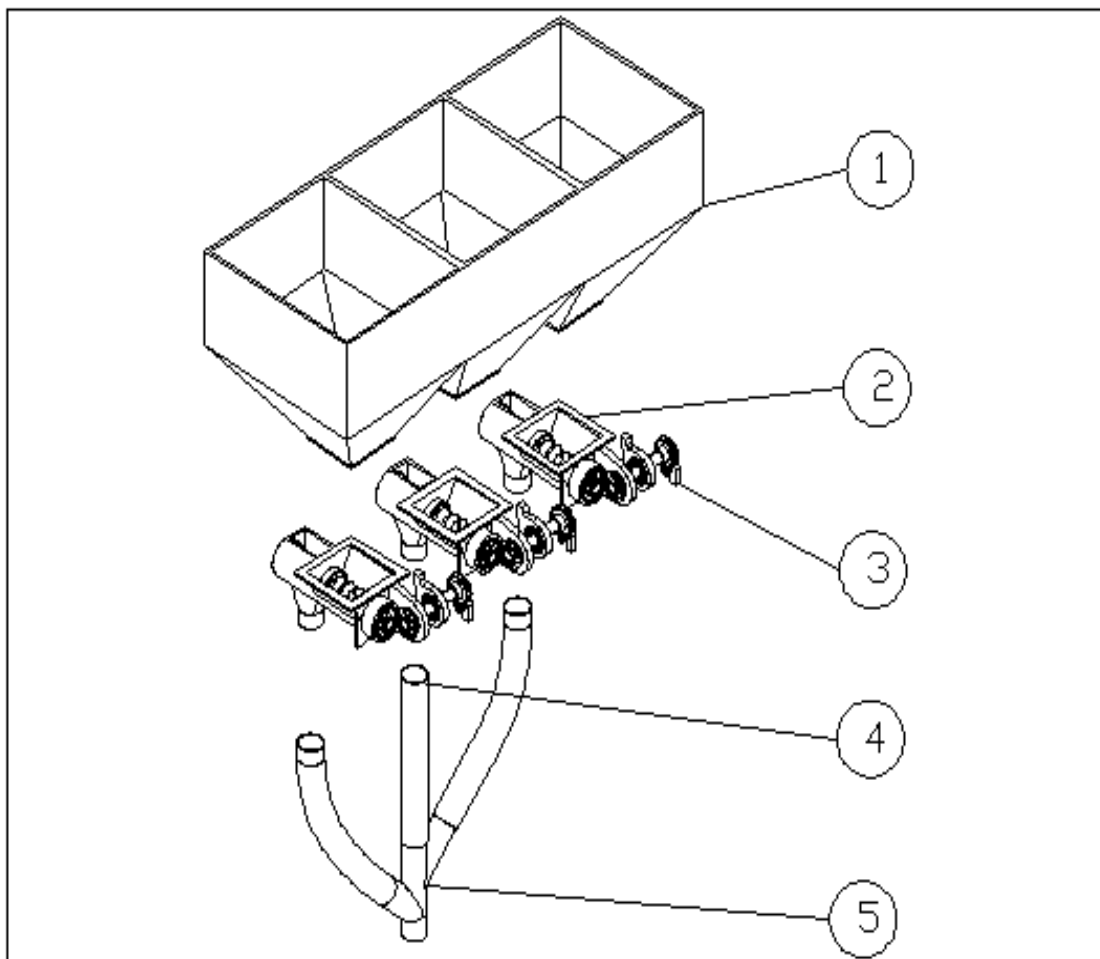


Figura 19 - Diagrama esquemático do conjunto.

4.2. COMPONENTES ELETRÔNICOS

Os ensaios foram realizados em laboratório com um software de instrumentação e controle virtual (LabVIEW®), que tem como função controlar a rotação dos eixos dos três motores elétricos de corrente contínua de 12 volts de maneira independente, baseando-se em dados de um mapa de recomendação com localização georreferenciada, obtendo a vazão mássica do produto desejado ponto a ponto com vazão variável dependente da rotação do

motor. Para isso foram usados: uma fonte variável de 12 volts (1) para alimentar os motores e encoders, uma estação de trabalho (2), uma placa de aquisição de dados da National Instruments (3), dois drivers de potência MOSFET com PWM acoplado (4), um PWM com potenciômetro para controle manual (5) e três Encoders (6).

1). Fonte variável

A fonte variável como mostra a Figura 20, é utilizada para converter energia elétrica alternada em contínua para a alimentação dos motores (12V) e encoders (5V), Marca ICEL : Mod. PS - 6100.

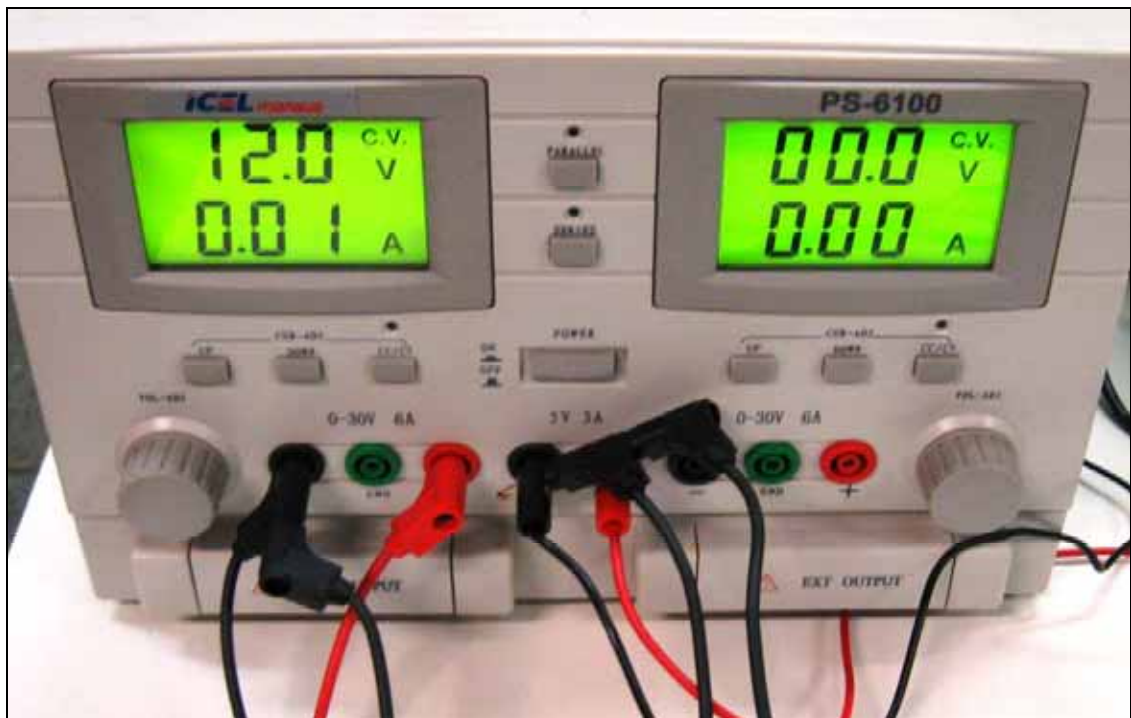


**Figura 20 - Fonte de alimentação variável.
Fonte: Icel.**

2). Estação de trabalho

Microcomputador utilizando um processador Intel Core 2 Duo E 7400, HD de 500 Gigabytes, memória RAM de 3 Gigabytes, placa de aquisição de dados e software (LabVIEW®), versão 8.6.

3). Placa de aquisição

Para a aquisição de dados utilizou-se uma placa NATIONAL INSTRUMENTS, NI PCI 6251, que envia e recebe informações do processamento (Figura 21).



Figura 21 - Placa de aquisição.
Fonte: National Instruments.

4). Drives

Para o controle dos motores foram utilizados drivers de potência (MOSFET), com PWM acoplado para variar a rotação dos motores, dimensionados e montados para o experimento, como mostra a Figura 22.

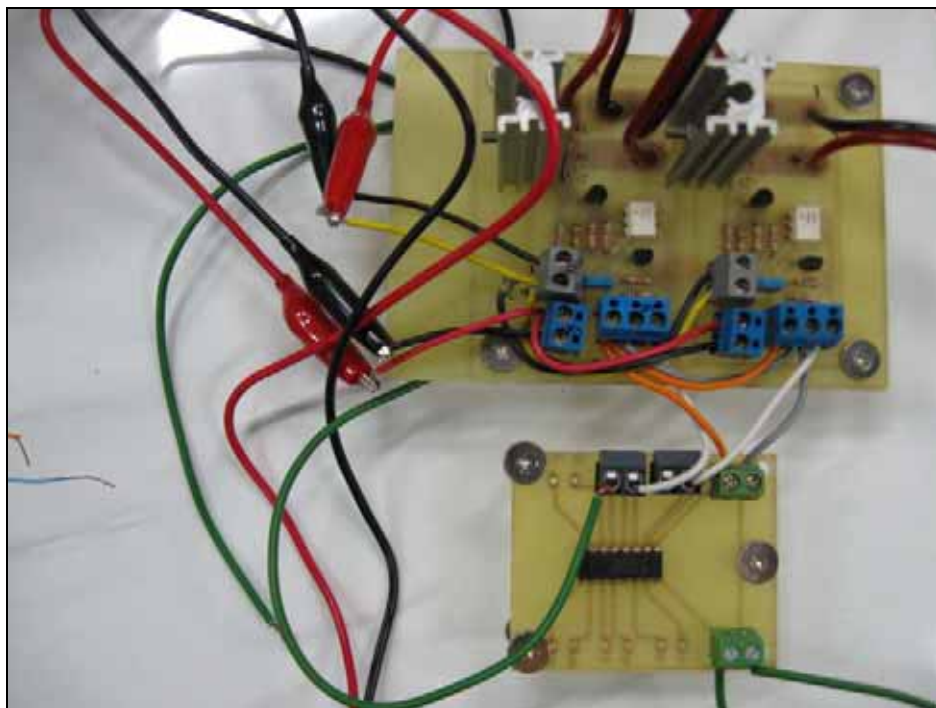


Figura 22 - Driver de potência (MOSFET).

5). Driver com potenciômetro

A rotação do motor de vazão fixa foi controlada por modulação em largura de pulsos (PWM) manual com o auxílio de um potenciômetro, mostrado na Figura 23.

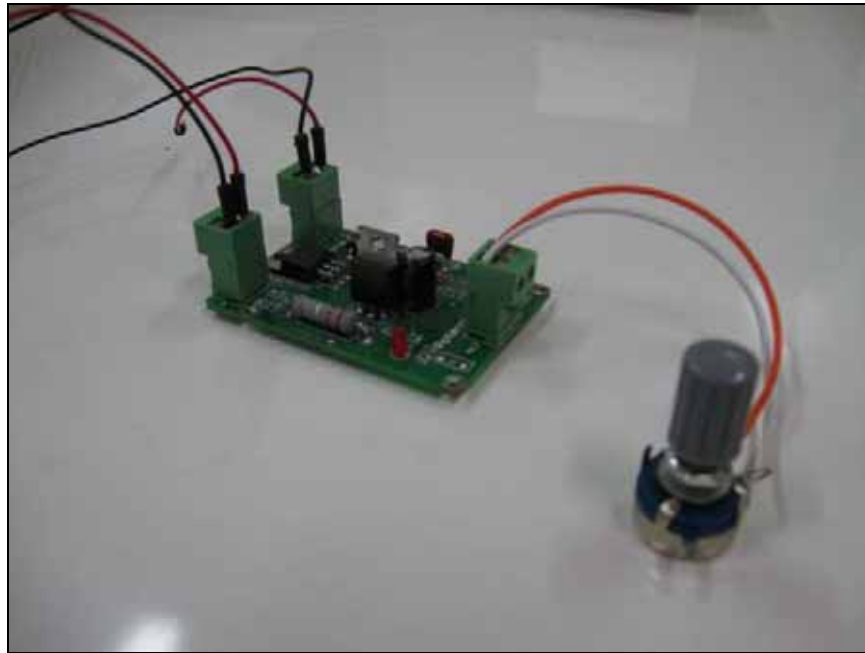


Figura 23 - Driver com potenciômetro.

Para facilitar a ligação e o transporte sem que houvesse a possibilidade de danos a esses componentes eletrônicos, pois os mesmos são sensíveis a problemas de variação de tensão e curto-circuito, decidiu-se acomodá-los em uma caixa de PVC, fixados na base desta com cola de silicone e arrefecidos por coolers, como mostra a Figura 24.

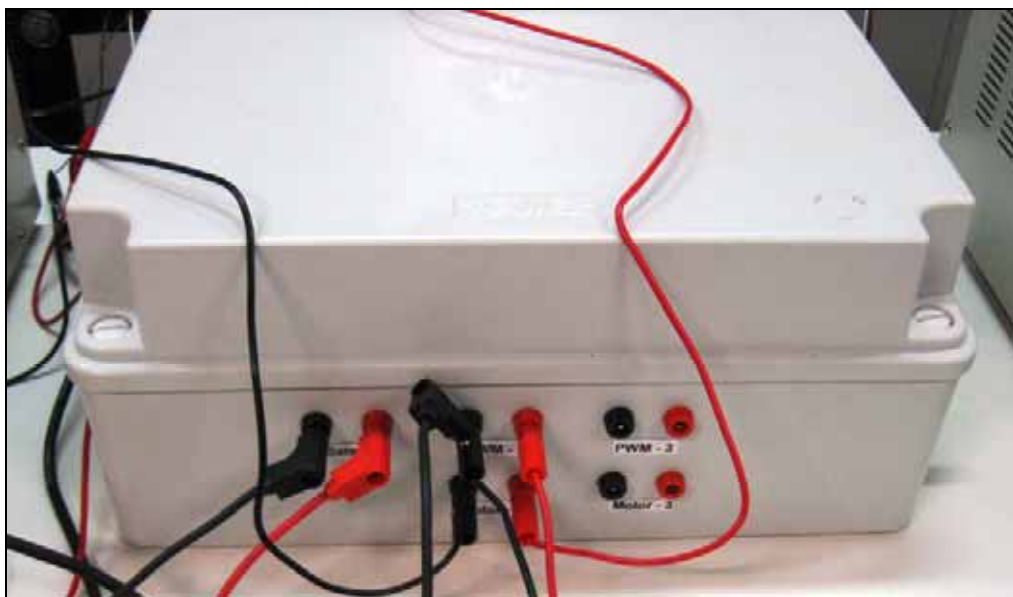


Figura 24 - Caixa de PVC com bornes para ligação.

6). Encoder

Para fornecer controles precisos em velocidades de rotação dos motores através do posicionamento angular foram utilizados os Encoders, Marca Avago, Mod. HEDS-5700 como mostra a Figura 25. Os Encoders (Geradores de Impulsos) são equipamentos eletromecânicos, utilizados para conversão de movimentos rotativos em impulsos elétricos de onda quadrada, que geram uma quantidade exata de impulsos por volta em uma distribuição perfeita dos pulsos ao longo dos 360 graus do giro do eixo.



Figura 25 - Encoder.
Fonte: Avago.

A figura 26 mostra a bancada de testes, que auxiliada pelos componentes eletrônicos foi utilizada para a validação do experimento.



Figura 26 - Foto da Bancada de testes.

4.3. DETERMINAÇÃO DA FERTILIDADE DO SOLO

Para o ensaio do protótipo faz-se necessário o uso de um mapa de aplicação de fertilizante devidamente georreferenciado, ou seja, cada ponto de aplicação deve possuir duas coordenadas geográficas que são determinadas pelo GPS, como não se dispunha de mapa georreferenciado foram utilizados mapas já existentes com parâmetros para realização dos testes, o método escolhido e utilizado foi o de amostragem por célula.

Após mapear determinado talhão, faz-se necessária a subdivisão do mesmo em áreas menores para que se possam trabalhar pequenas glebas gerando um número maior de informações sobre a fertilidade local. Para isso utiliza-se uma malha sobre o perímetro da área, denominado de *grids* de amostragem, como mostra a Figura 27. O tamanho do *grid* depende de alguns fatores como: uniformidade de produção, relevo e histórico da área.

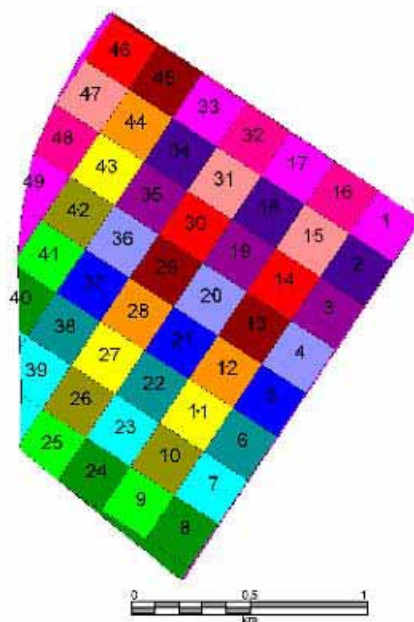


Figura 27 - Grid de amostragem do solo com pontos amostrais determinados.
Fonte: Zulli (2008).

A partir das análises de solo e das coordenadas geográficas dos pontos amostrais, são gerados os mapas de fertilidade, onde se tem para cada elemento analisado e para cada talhão amostrado um mapa mostrando as variações de concentrações de cada elemento no solo. Esses mapas geralmente elaborados por técnicos da área agrônômica e gerados por softwares específicos baseados em dados da análise do solo e da necessidade nutricional da planta em questão, como mostra a Figura 28.

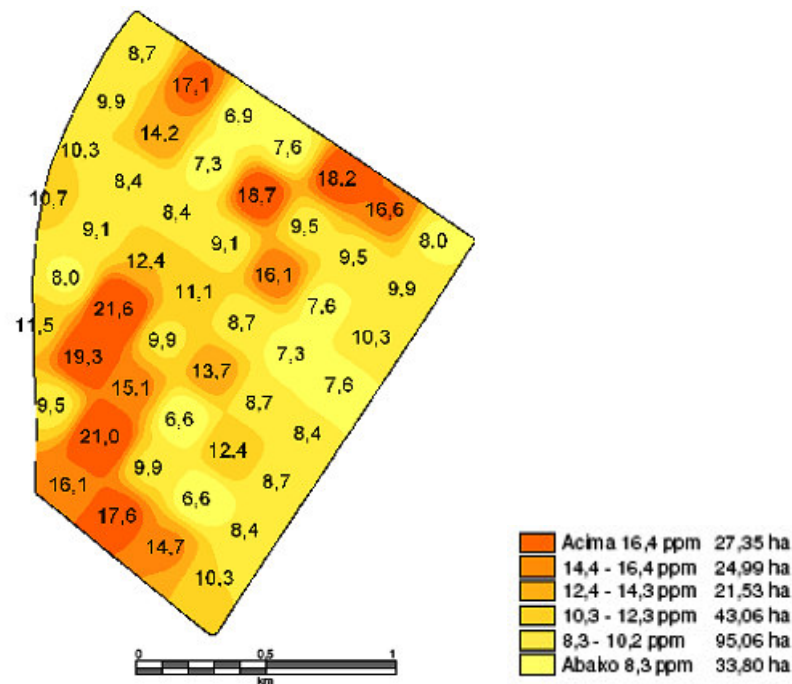


Figura 28 - Mapa de fertilidade do solo.

Fonte: Zulli (2008).

Utilizando um mapa de aplicação mostrado na Figura 29, obtido após todo o estudo de fertilidade do solo e inserido em um computador com a placa de aquisição de dados e com auxílio de um GPS para as informações exatas das coordenadas geográficas, o mesmo mandará informações ao motor elétrico, cuja função será de regular a rotação através do software de instrumentação e controle virtual, fazendo com que o motor tenha uma rotação equivalente, dependendo da quantidade de fertilizante necessária em cada ponto amostral do solo no momento do plantio.

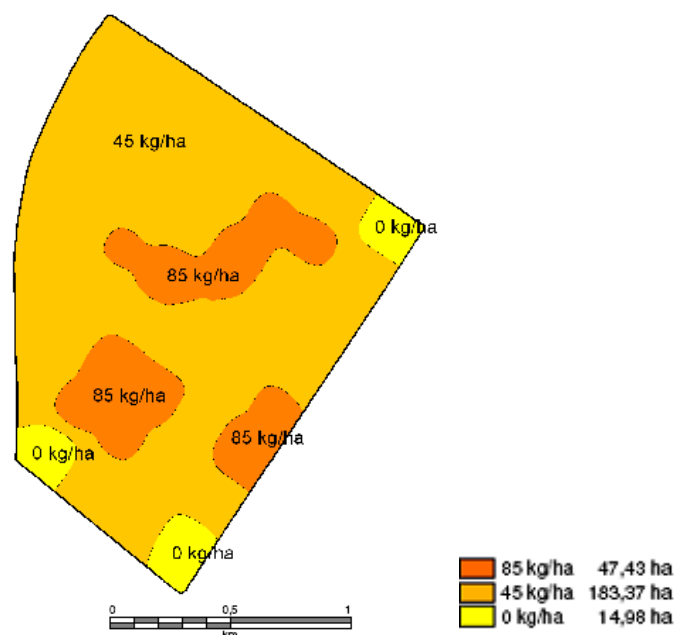


Figura 29 - Mapa de aplicação de fertilizante.

Fonte: Zulli (2008).

4.4. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.4.1. Avaliação da Dosagem Teórica do Dosador

No teste utilizando o controle PID e o mapa de aplicação de fertilizantes realizado com um só elemento (P) e com células de 50 x 50m. Foi utilizado como exemplo o mapa da Figura 29, com uma variação de 0 a 85kg/ha de fósforo, numa rota para ser percorrida pela máquina passando por 8 células amostrais que deverá ser seguida em linha de ida e volta com velocidade constante de 1,6m/s, para a aplicação exata do produto e obedecendo sempre um espaçamento entre linhas de plantio de 0,70m, obtendo-se os valores da vazão mássica (Desejada), vale lembrar que os testes foram realizados apenas para um motor com dosador de rosca helicoidal de 25,4mm de passe e que o exemplo foi idealizado para uma adubadora-semeadora para plantio de milho.

Utilizando-se a constante da equação (3) e multiplicando pela rotação desejada de 0 a 35 rpm, foi possível traçar um gráfico com a vazão mássica desejada para posteriormente ser comparada com a vazão mássica obtida nos ensaios experimentais, como mostra a figura 30.

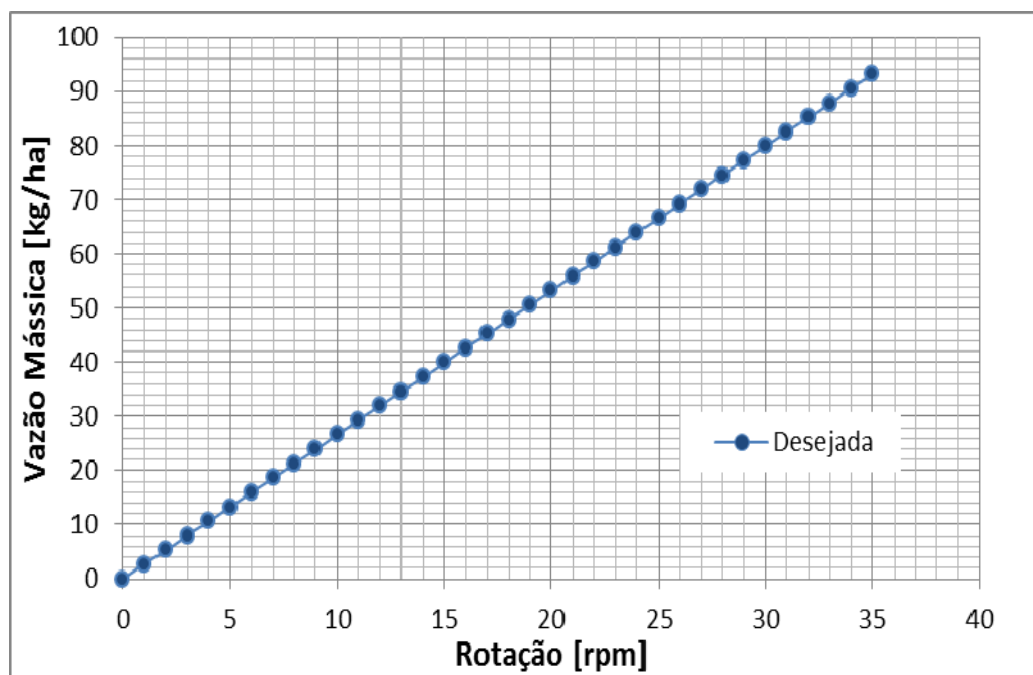


Figura 30 - Gráfico da rotação versus Vazão mássica (Teórica).

Vale ressaltar que de acordo com a referência de 45 kg/ha de fertilizante levantada no mapa de aplicação equivale a uma rotação de 17 rpm, com essa rotação teoricamente entregaria 45,54 kg/ha de fertilizante por célula que é o valor mais próximo da quantidade levantada pelo mapa de aplicação.

Essa quantidade de fertilizante foi definida com auxílio da q_{Fd} (quantidade de fertilizante desejada para a área a ser fertilizada por rpm igual a 2,6786 kg/ha.rpm) vezes 17 rpm. Assim também foi feito para a referência de 85 kg/ha de fertilizante do mapa de aplicação, obtendo o valor teórico de 85,72 kg/ha (igual a 32 rpm vezes 2,6786 kg/ha.rpm), no local onde o mapa de aplicação pedir 0 o valor teórico será zero, pois o dosador estará parado, ou melhor, sem giro nesse ponto.

4.4.2. Conversão da Rotação do Dosador em Vazão Mássica

Para o produto obtido através do funcionamento do dosador, utilizou-se o seguinte procedimento experimental:

Foram realizadas sete medições para cada rotação, variando de quatro em quatro rpm (4, 8, 12, 16, 20, 24, 28, 32 rpm); o dosador funcionou de modo contínuo, ou seja, esperou-se a estabilização da rotação para dar início a contagem do tempo e liberação do fertilizante no recipiente de controle; o recipiente de controle foi tarado e após a medida de liberação do fertilizante era levada para medição da massa de adubo liberada pelo dosador; após as sete medições para cada rotação, fez-se uma média aritmética da massa para cada uma dessas rotações; para o tempo foi utilizado o número inteiro (31), pois facilita o trabalho na coleta das amostras; para a rotação de 17rpm do dosador cuja vazão mássica será requerida no mapa de aplicação da qual não foi utilizada no ensaio da vazão real, o valor real aproximado para essa rotação será calculada por uma interpolação entre 16 e 20rpm da vazão real.

Para conversão da rotação do dosador em vazão mássica por hectare faz-se necessária à coleta da massa real aplicada pelo dosador distribuída no espaço requerido. Obtendo o valor médio do (q_s) para cada rotação e substituindo-se na equação (2), obtém-se assim a quantidade de fertilizante aplicado por unidade de área, como mostra a Tabela 1.

Tabela 1 - Rotação convertida em vazão mássica.

Rotação [rpm]	Tempo [s]	Massa [g]	Quant. De Fertilizante [Kg/ha]
4	31	34,27	9,79
8	31	70,57	20,16
12	31	105,96	30,27
16	31	144,22	41,20
20	31	180,49	51,56
24	31	221,00	63,14
28	31	261,44	74,69
32	31	302,81	86,51

4.4.3. Simulação computacional

Para iniciar a simulação é necessário que se faça a checagem de todos os componentes eletrônicos, regulagem da fonte de tensão, verificação das ligações do motor, do Encoder, da placa de aquisição e por último do desktop, feito isso basta ligar o desktop e esperar carregar o LabVIEW®, logo após alimenta-se os componentes eletrônicos e em seguida liga-se a fonte.

Ao abrir o painel de controle do LabVIEW® é só iniciar a simulação apertando um botão de start no programa que, no mesmo instante, o motor começa a girar. Para alterar a rotação do mesmo, basta digitar o número no set point, para parar o motor basta apertar um botão de stop.

A priori, todos os testes foram feitos com o motor sem carga, ou seja, sem a utilização de produto, pois se tinha a intenção de verificar o funcionamento de maneira isolada, e então, só depois de rodar sem problemas seria utilizado com carga.

Nesses ensaios utilizando a placa de aquisição vários parâmetros de controle (Proporcional, Integrativo, Derivativo) foram utilizados e ajustados manualmente a fim de se obter menores oscilações possíveis na curva de simulação, desses os que mais se adequaram ao sistema foram: $P = 1,500$; $I = 0,002$; $D = 0,000$ a Figura 31, mostra esses valores no painel de controle, assim como os gráficos de rotação, ação de controle e posição angular do sistema.

Também foram utilizadas três frequências do PWM para o ensaio. São elas: 20; 50; 100 Hz, nesses ensaios percebeu-se que a frequência tem uma relação indireta com o torque, ou seja, quanto maior for a frequência menor será o torque do motor, porém quanto menor for a frequência maior será a vibração no eixo do motor estabelecendo aqui novamente uma relação indireta. Em todos os testes a taxa de aquisição foi de 10 amostras por segundos.

Com o objetivo de fazer a simulação apenas para um motor, foi necessária a elaboração de uma programação diferente, embora tenha sido utilizado o mesmo controle (PID). Essa simulação que o motor fez de maneira individual e os dados que foram coletados serviram para analisar de uma forma minuciosa o comportamento do mesmo em tempo real. Essa programação pode ser vista no diagrama de blocos da Figura 32.

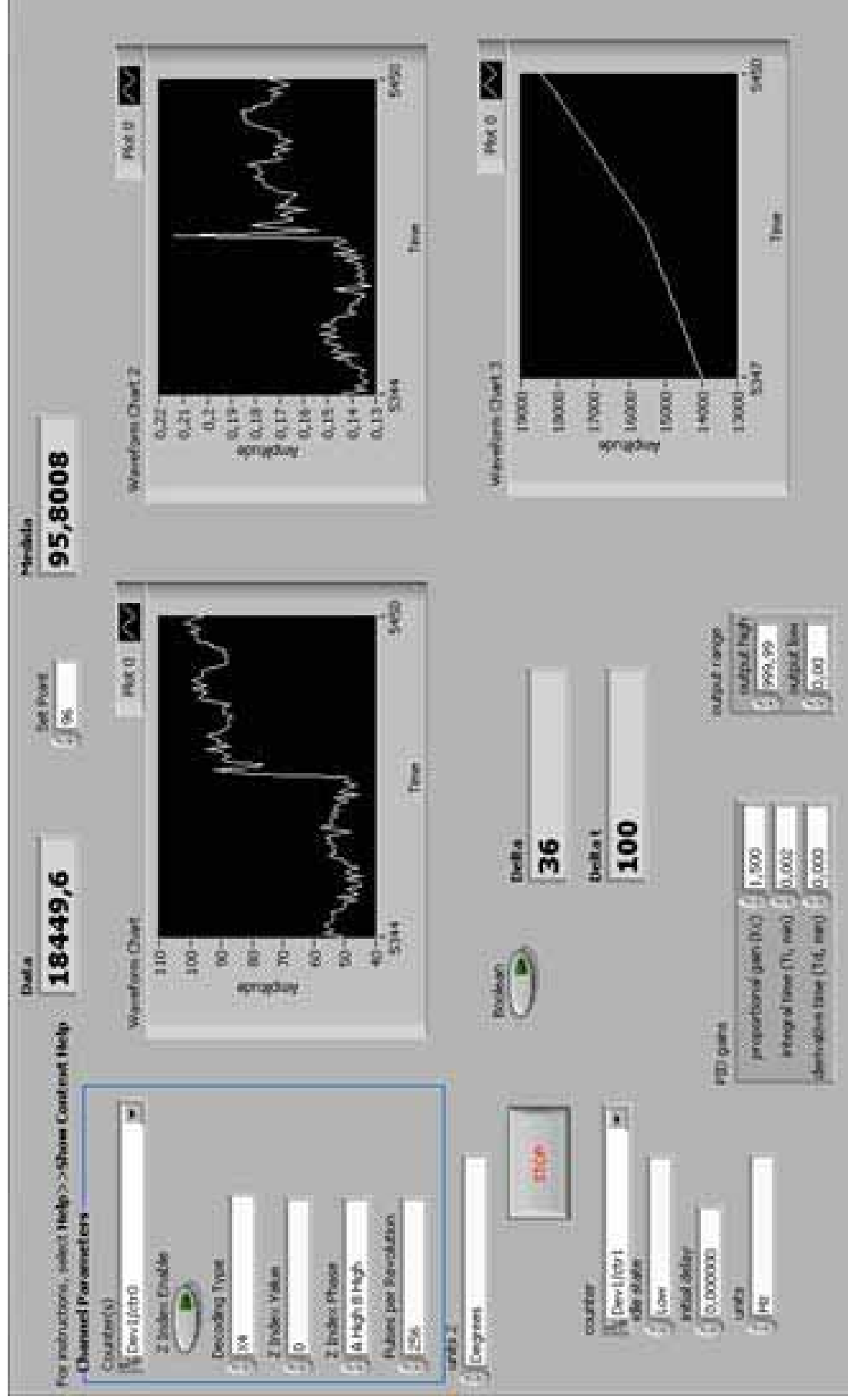


Figura 31 - (Painel de Controle) Simulação do motor com controle PID.

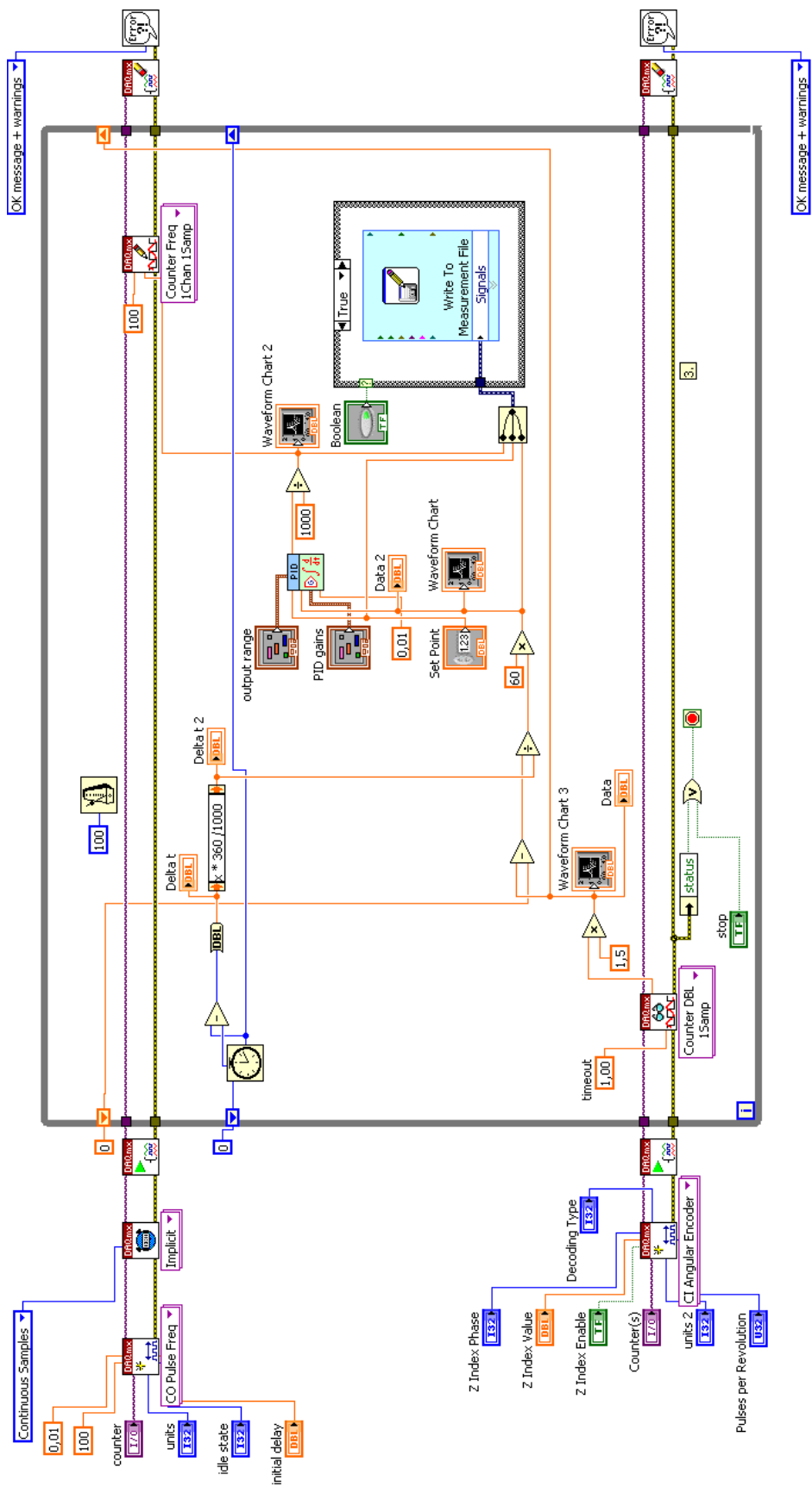


Figura 32 - (Diagrama de Blocos) Simulação do motor com controle PID.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. ANÁLISE DOS PARÂMETROS INICIAIS

A quantidade de produto que deveria ser aplicado por volta, foi definida após vários testes, onde se girava o dosador uma volta completa coletando o produto. Logo após pesava-se o material e repetia-se novamente quantas vezes fossem necessárias, como mostra a Tabela 2 os valores coletados em gramas de produto por rpm. Dessa tabela foi pego o valor de 18g de Fósforo utilizado nos cálculos teóricos.

Tabela 2 - Coleta de fertilizante em uma revolução completa do dosador.

Nº da Amostra	Nitrogênio [g/rpm]	Fósforo [g/rpm]	Potássio [g/rpm]
1	15	19	17,5
2	14,5	19	17
3	15,5	19,5	17,5
4	14	19	17,5
5	14	17	17,5
6	14	18,5	18
7	13,5	18,5	17,5
8	14	18,5	17,5
9	14	17,5	17,5
10	14	17	17,5
Media	14,25	18,35	17,50
Desvio padrão	0,589	0,883	0,235

5.2. VERIFICAÇÃO DA VAZÃO MÁSSICA REAL DO DOSADOR

Para a rotação de 4rpm a Tabela 3, mostra os valores das amostras coletadas cujo valor médio da massa será substituído na equação (2) para obtenção da quantidade de fertilizante por hectare, que será comparado com o valor desejado. Substituindo, tem-se: $q_A = 9,79\text{kg/ha}$

Tabela 3 - Coleta do (qS) a 4rpm.

Nº da Amostra	Rotação [rpm]	Tempo [s]	Massa [g]
1	4	31	33,91
2	4	31	35,62
3	4	31	34,10
4	4	31	34,32
5	4	31	34,24
6	4	31	34,43
7	4	31	33,24
Media			34,27
Desvio padrão			0,715

Para a rotação de 8rpm a Tabela 4, mostra os valores das amostras coletadas cujo valor médio da massa será substituído na equação (2) para obtenção da quantidade de fertilizante por hectare, que será comparado com o valor desejado. Substituindo, tem-se: $q_A = 20,16\text{kg/ha}$

Tabela 4 - Coleta do (qS) a 8rpm.

Nº da Amostra	Rotação [rpm]	Tempo [s]	Massa [g]
1	8	31	72,47
2	8	31	70,52
3	8	31	67,60
4	8	31	69,97
5	8	31	69,85
6	8	31	68,96
7	8	31	74,61
Media			70,57
Desvio padrão			2,318

Para a rotação de 12rpm a Tabela 5, mostra os valores das amostras coletadas cujo valor médio da massa será substituído na equação (2) para obtenção da quantidade de fertilizante por hectare, que será comparado com o valor desejado. Substituindo, tem-se: $q_A = 30,27\text{kg/ha}$

Tabela 5 - Coleta do (qS) a 12rpm.

Nº da Amostra	Rotação [rpm]	Tempo [s]	Massa [g]
1	12	31	104,65
2	12	31	108,95
3	12	31	104,08
4	12	31	111,67
5	12	31	102,69
6	12	31	106,19
7	12	31	103,49
Media			105,96
Desvio padrão			3,257

Para a rotação de 16rpm a Tabela 6, mostra os valores das amostras coletadas cujo valor médio da massa será substituído na equação (2) para obtenção da quantidade de fertilizante por hectare, que será comparado com o valor desejado. Substituindo, tem-se: $q_A = 41,20\text{kg/ha}$

Tabela 6 - Coleta do (qS) a 16rpm.

Nº da Amostra	Rotação [rpm]	Tempo [s]	Massa [g]
1	16	31	145,28
2	16	31	144,34
3	16	31	143,75
4	16	31	143,24
5	16	31	143,79
6	16	31	145,70
7	16	31	143,42
Media			144,22
Desvio padrão			0,943

Para a rotação de 20rpm a Tabela 7, mostra os valores das amostras coletadas cujo valor médio da massa será substituído na equação (2) para obtenção da quantidade de fertilizante por hectare, que será comparado com o valor desejado. Substituindo, tem-se: $q_A = 51,56\text{kg/ha}$

Tabela 7 - Coleta do (qS) a 20rpm.

Nº da Amostra	Rotação [rpm]	Tempo [s]	Massa [g]
1	20	31	180,67
2	20	31	181,78
3	20	31	181,58
4	20	31	180,89
5	20	31	179,40
6	20	31	181,58
7	20	31	177,56
Media			180,49
Desvio padrão			1,528

Para a rotação de 24rpm a Tabela 8, mostra os valores das amostras coletadas cujo valor médio da massa será substituído na equação (2) para obtenção da quantidade de fertilizante por hectare, que será comparado com o valor desejado. Substituindo, tem-se: $q_A = 63,14\text{kg/ha}$

Tabela 8 - Coleta do (qS) a 24rpm.

Nº da Amostra	Rotação [rpm]	Tempo [s]	Massa [g]
1	24	31	220,24
2	24	31	218,91
3	24	31	220,02
4	24	31	222,67
5	24	31	223,42
6	24	31	221,29
7	24	31	220,45
Media			221,00
Desvio padrão			1,578

Para a rotação de 28rpm a Tabela 9, mostra os valores das amostras coletadas cujo valor médio da massa será substituído na equação (2) para obtenção da quantidade de fertilizante por hectare, que será comparado com o valor desejado. Substituindo, tem-se: $q_A = 74,69\text{kg/ha}$

Tabela 9 - Coleta do (qS) a 28rpm.

Nº da Amostra	Rotação [rpm]	Tempo [s]	Massa [g]
1	28	31	260,56
2	28	31	262,16
3	28	31	262,21
4	28	31	260,96
5	28	31	263,04
6	28	31	258,57
7	28	31	262,60
Media			261,44
Desvio padrão			1,542

Para a rotação de 32rpm a Tabela 10, mostra os valores das amostras coletadas cujo valor médio da massa será substituído na equação (2) para obtenção da quantidade de fertilizante por hectare, que será comparado com o valor desejado. Substituindo, tem-se: $q_A = 86,51\text{kg/ha}$

Tabela 10 - Coleta do (qS) a 32rpm.

Nº da Amostra	Rotação [rpm]	Tempo [s]	Massa [g]
1	32	31	300,94
2	32	31	303,13
3	32	31	302,77
4	32	31	303,69
5	32	31	305,14
6	32	31	300,21
7	32	31	303,81
Media			302,81
Desvio padrão			1,711

5.3. AFERIÇÃO INICIAL DO MOTOR

Para iniciar a verificação da precisão do sistema foi realizado um teste do motor com frequência do PWM-100Hz sem carga e sem acopla-lo a redução e ao eixo do dosador, ou

seja, com o motor rodando livre de forma a observar se havia interferência no sistema e se o Encoder estaria enviando os sinais de forma precisa. Verificou-se que o motor mesmo funcionando sem carga e desacoplado da redução, manteve uma pequena oscilação na ordem de aproximadamente 3rpm para mais ou para menos na rotação, fatos que podem ser vistos nos gráficos da rotação e da ação de controle nas Figuras 33 e 34, respectivamente.

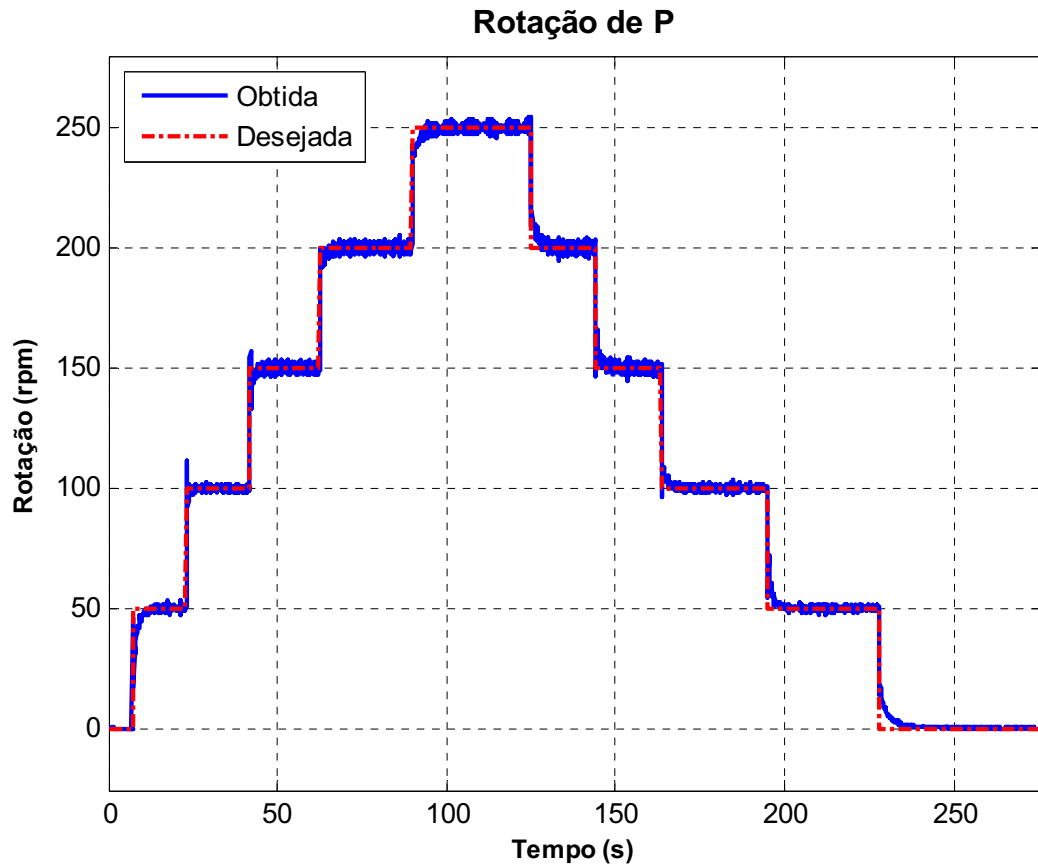


Figura 33 - Gráfico da Rotação do motor sem carga e desacoplado (PWM-100Hz).

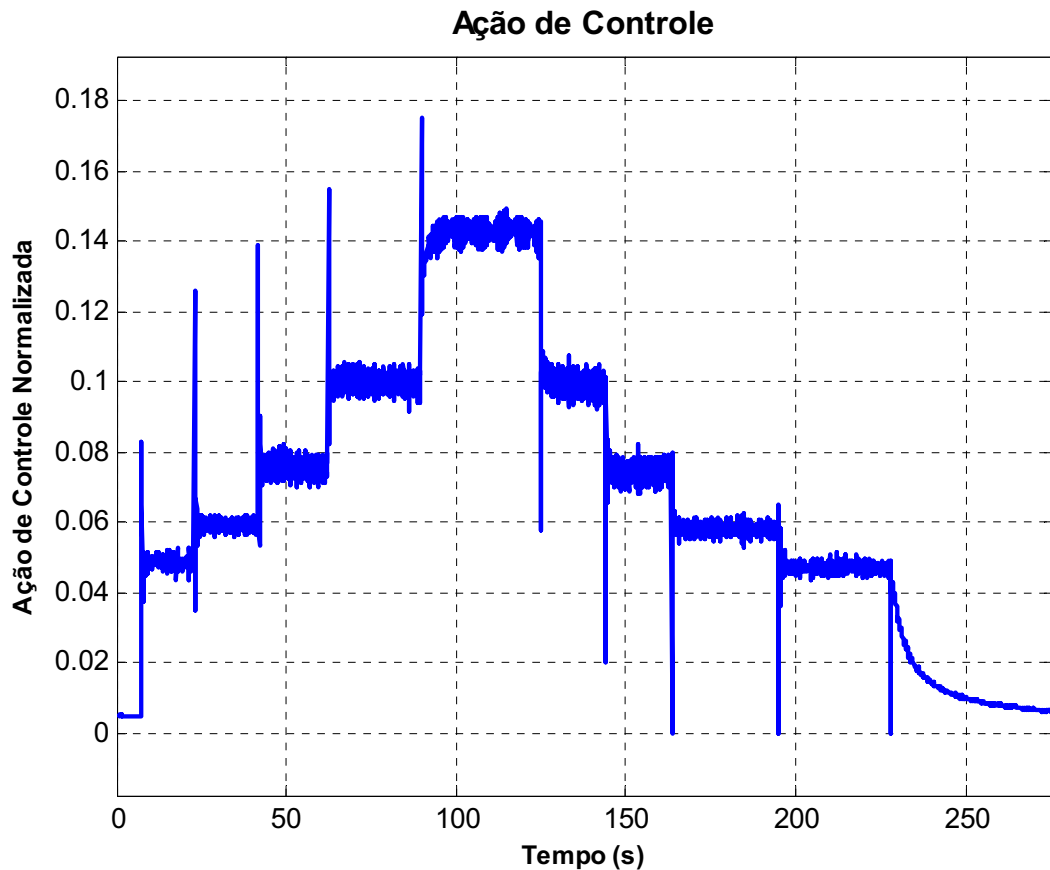


Figura 34 - Gráfico da Ação de Controle do motor sem carga e desacoplado (PWM-100Hz).

5.4. EFEITO DA TRANSMISSÃO

A verificação do sistema em função da rotação do motor que, transformada em vazão mássica do fertilizante, definiu se o sistema era ou não viável. Assim, foi plotado um gráfico com os dados do teste de controle sem carga para o motor acoplado a uma frequência do PWM-100Hz, conforme mostram os gráficos da rotação e da ação de controle nas Figuras 35 e 36 respectivamente. Nota-se uma oscilação na rotação na ordem de 10rpm para mais ou para menos em relação aos valores desejados, e percebe-se que houve um aumento da oscilação em relação ao teste anterior, fato que ocorre devido à transmissão que existe entre o motor e o eixo do dosador.

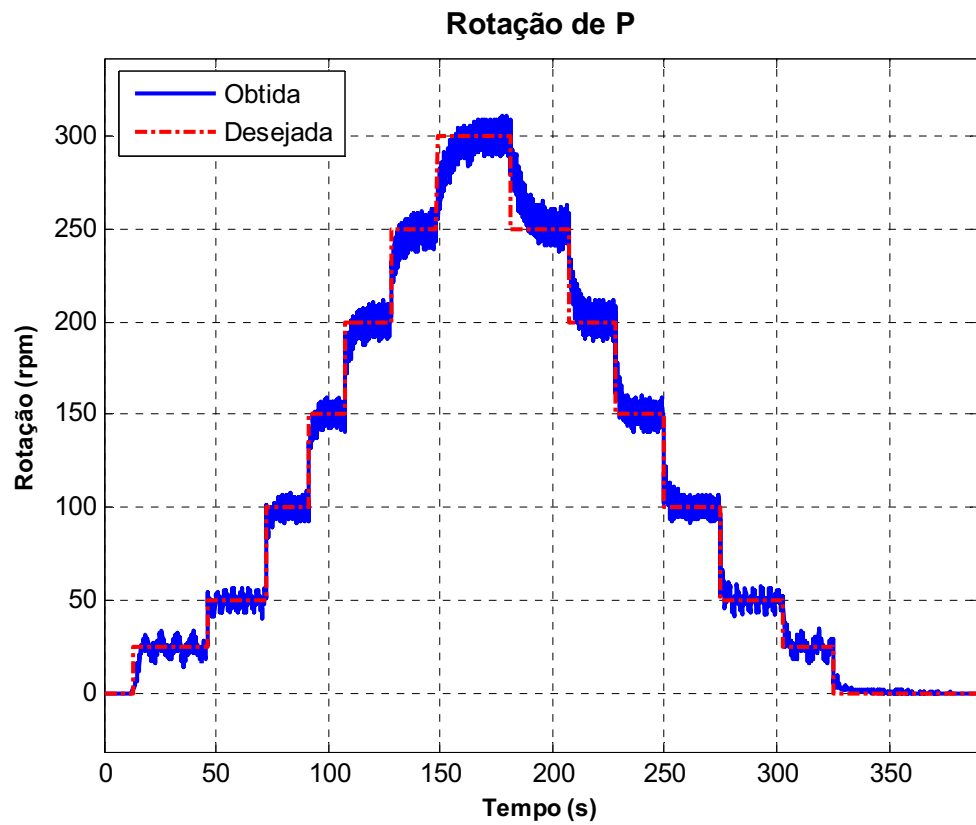


Figura 35 - Gráfico da Rotação do motor acoplado sem carga (PWM-100Hz).

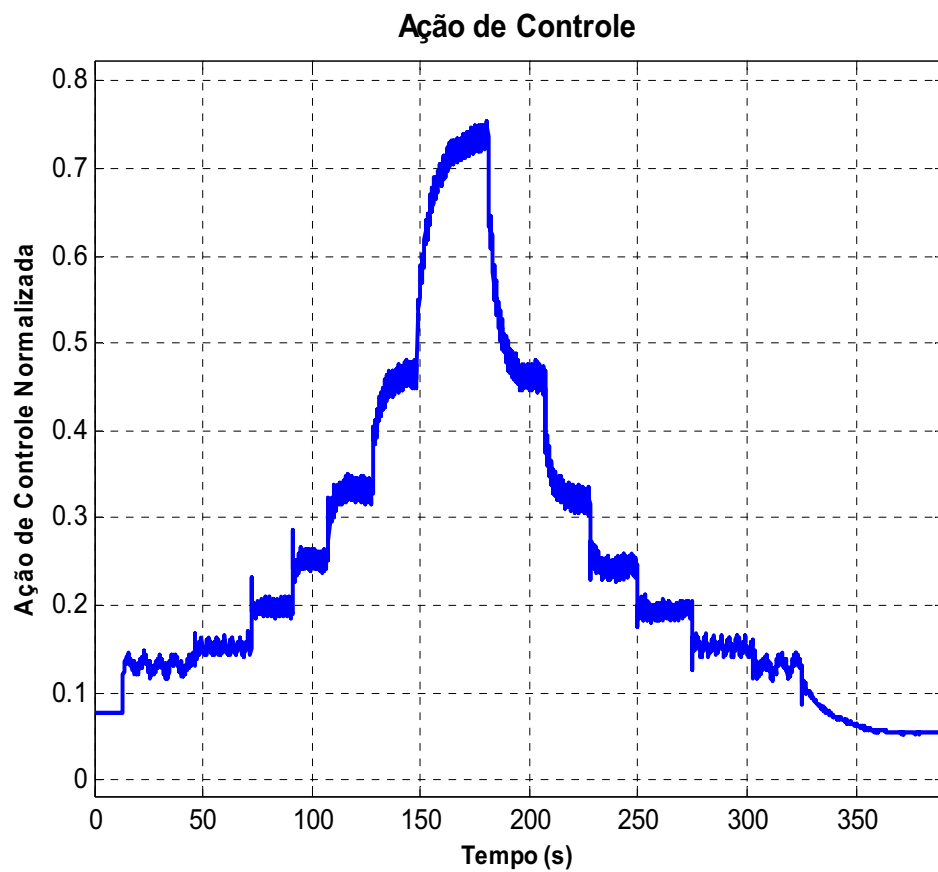


Figura 36 - Gráfico da Ação de Controle do motor acoplado sem carga (PWM-100Hz).

5.5. AVALIAÇÃO DO TORQUE DO MOTOR

Posteriormente repetiu-se o teste de controle, porém com carga e com o motor acoplado, ou seja, utilizando o fertilizante como se fosse a real situação de trabalho, também com a mesma frequência do PWM-100Hz, conforme ilustram os gráficos da rotação e da ação de controle nas Figuras 37 e 38 respectivamente. Nota-se uma oscilação na rotação na ordem de 25rpm para mais ou para menos em relação aos valores desejados, e percebe-se que houve um aumento na oscilação da rotação, fato que se da pela diferença de torque em relação ao teste anterior, acredita-se que esse comportamento pode prejudicar a precisão do sistema e, conseqüentemente alterar os valores das taxas de aplicação de nutrientes.

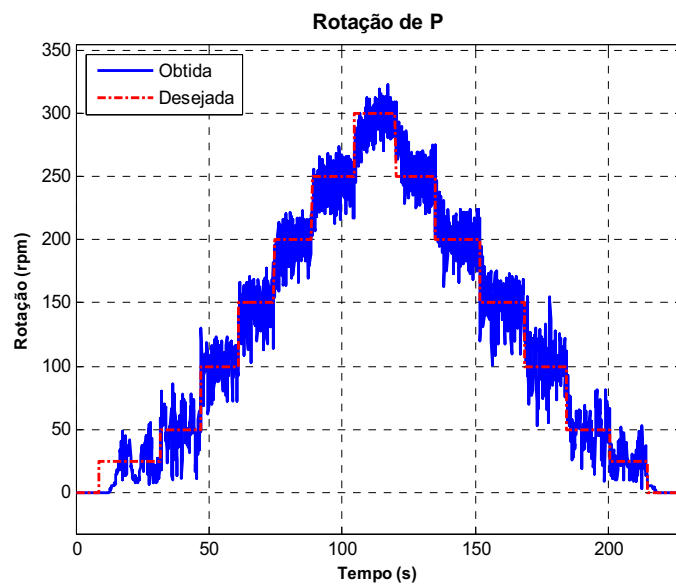


Figura 37 - Gráfico da Rotação do motor acoplado com carga (PWM-100Hz).

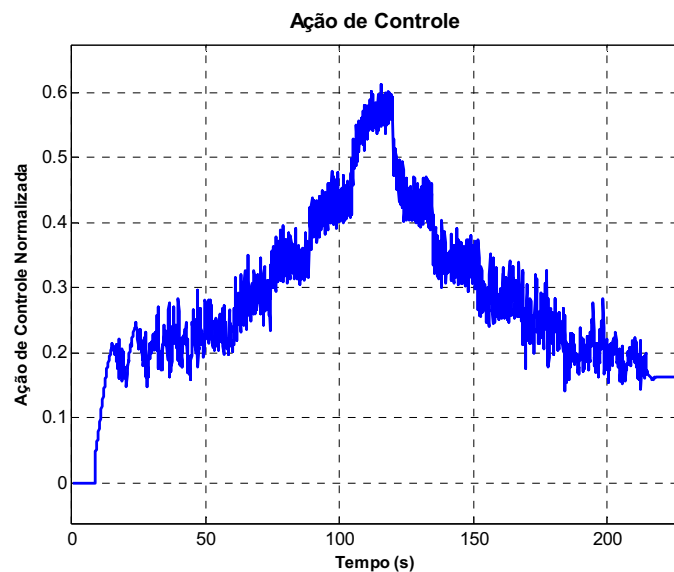


Figura 38 - Gráfico da Ação de Controle do motor acoplado com carga (PWM-100Hz).

Ainda com relação aos testes do motor com carga e sem carga construiu-se um gráfico da Rotação do motor versus tensão do PWM aplicada, e notou-se um pequeno deslocamento da curva do motor com carga para a direita como mostra a Figura 39, afetando o torque do motor que só inicia a rotação do eixo do dosador a partir de aproximadamente 8% do (*duty cycle*) aplicado. Em geral os motores elétricos de corrente contínua tem sua rotação proporcional à tensão de alimentação. Utilizando-se o PWM o eixo do dosador gira a pleno torque, imediatamente a partir da aplicação da tensão do (*duty cycle*). Entretanto, com a alimentação de corrente contínua, o motor só iniciaria a rotação a partir da aplicação de 3V que é equivalente a 25% do (*duty cycle*) aplicado. Nessa tensão o torque não seria suficiente para girar o eixo com carga.

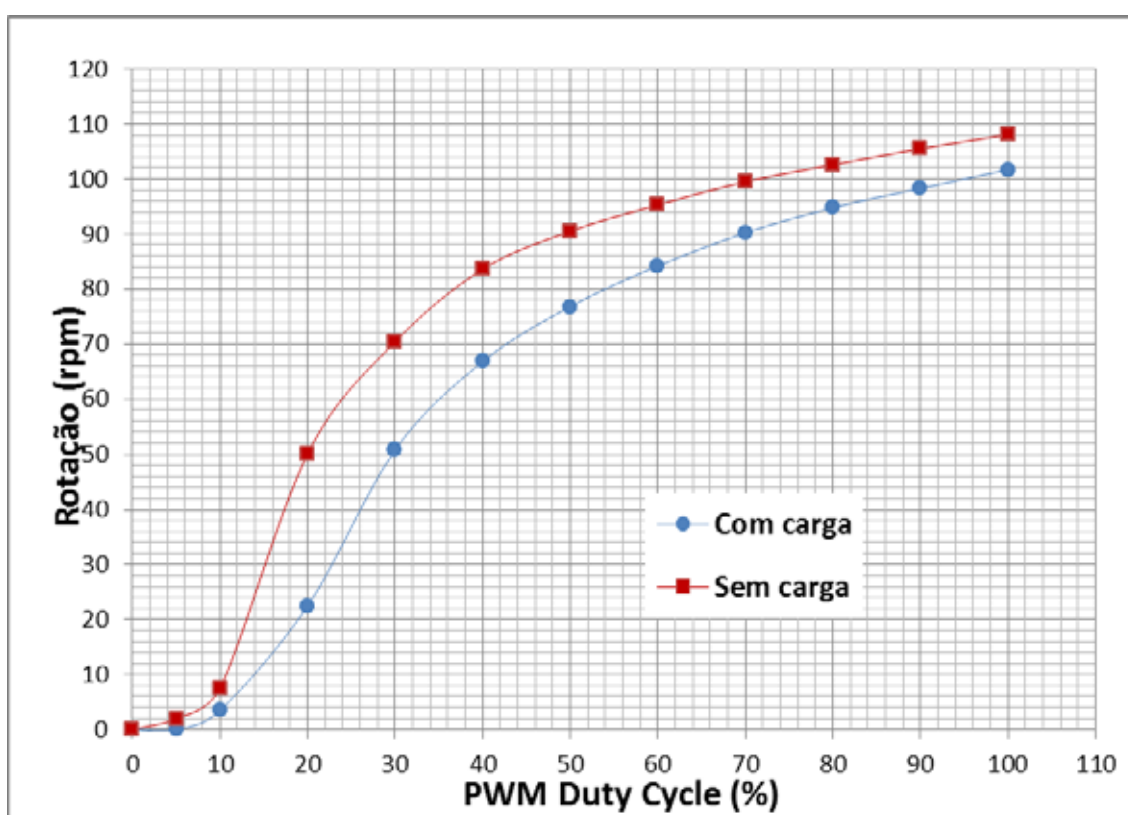


Figura 39 - Gráfico da Rotação do Motor versus Tensão do (PWM) Aplicada.

O atraso na partida do motor, afetando o torque do mesmo, com carga que se nota no gráfico da Figura 37, fica comprovado quando se analisa o gráfico da Rotação do motor versus Tensão do PWM aplicada da Figura 39. É notória a diferença do torque do motor entre as duas curvas, com um discreto deslocamento da curva com carga para a direita do gráfico causado pelo aumento da resistência ao escoamento do produto na rosca do helicoidal, que para o teste utilizou-se o passe da rosca de 25,4mm.

5.6. TESTE DE FREQUÊNCIA DO (PWM) DO MOTOR

No início dos testes do motor com carga foram utilizadas três frequências diferentes, pois se desejava observar o comportamento do motor em relação ao torque e foi constatado que aumentando a frequência tem-se uma diminuição no torque, e percebe-se também que quanto maior a frequência maior será o atraso do sinal de controle na partida, fato que pode ser constatado nos gráficos das Figuras 40, 41 e 42 para 20Hz, 50Hz e 100Hz do PWM respectivamente. Outro fato a ser mencionado é que quanto maior for a frequência menor será a vibração no eixo. Por questão de padronização optou-se por trabalhar com frequência fixa para todos os testes finais em 100Hz do PWM.

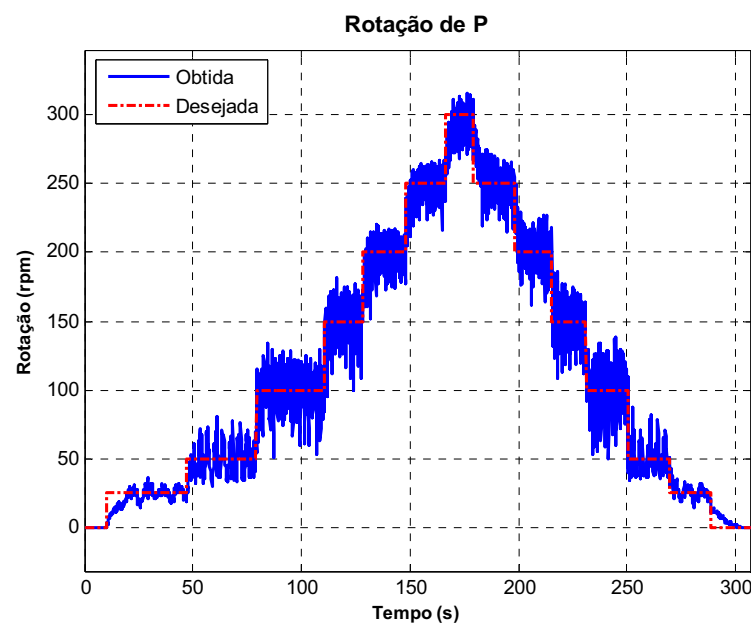


Figura 40 - Rotação do Motor com frequência 20Hz do PWM.

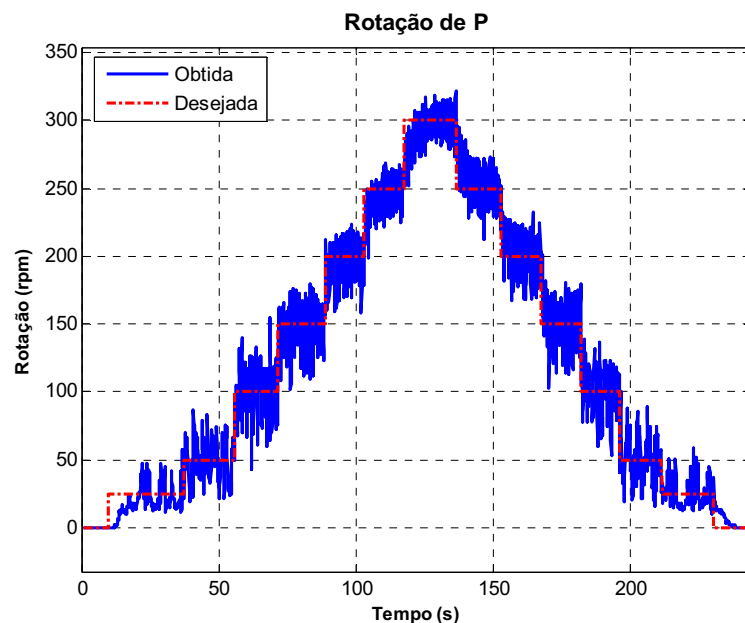


Figura 41 - Rotação do Motor com frequência 50Hz do PWM.

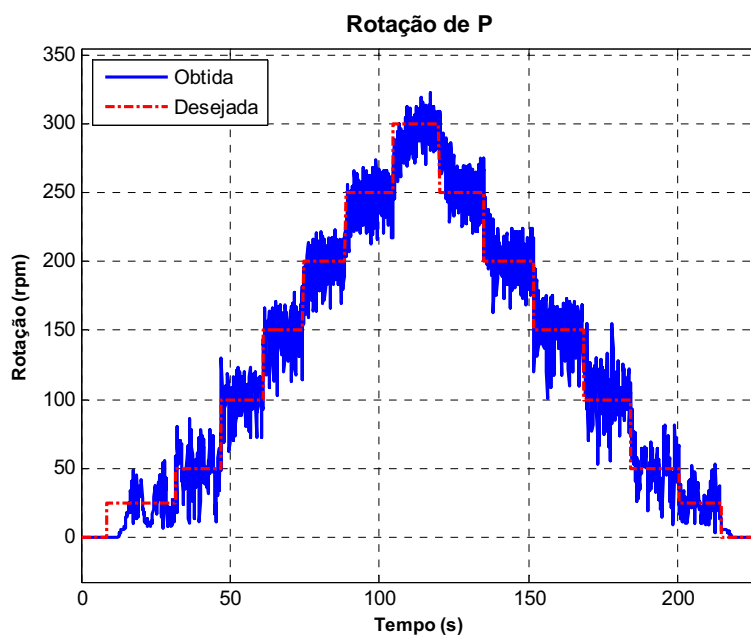


Figura 42 - Rotação do Motor com frequência 100Hz do PWM.

5.7. COMPARAÇÃO DA VAZÃO MÁSSICA (TEÓRICA e REAL)

Os valores da rotação, da quantidade necessária de produto de acordo com o mapa de aplicação, da quantidade teórica e real de produto aplicado pelo dosador utilizados na Tabela 11, foram obtidos pelo mapa de aplicação de fertilizante, pela Equação (3), pela realização dos testes experimentais em laboratório e por interpolação.

Tabela 11 - Valores da vazão mássica do dosador helicoidal.

Célula	Necessidade [kg/ha]	Teórica [kg/ha]	Real [kg/ha]	Rotação [rpm]
1	0	0	0	0
2	45	45,54	43,70	17
3	45	45,54	43,70	17
4	45	45,54	43,70	17
5	85	85,72	86,51	32
6	85	85,72	86,51	32
7	45	45,54	43,70	17
8	0	0	0	0

Célula – Número da célula no mapa de fertilidade do solo.

Necessidade – Produto requerido em [kg/ha] na respectiva célula do mapa.

Teórica – Produto desejado em [kg/ha] na respectiva célula do mapa.

Real - Produto Obtido do Dosador em [kg/ha] na respectiva célula do mapa.

Rotação - Rotação do eixo do dosador [rpm]

Comparando os valores da Tabela 11, com o intuito de fazer a verificação do comportamento dos dados, foram comparados primeiro os valores de referências com os valores teóricos. Com isso percebe-se que o erro associado aos valores teóricos com relação aos valores de referência se dá por conta das aproximações na utilização das rotações, ou seja, utilizaram-se apenas as rotações inteiras com variação de um em um rpm. Assim, no caso de se querer aproximar o valor teórico do valor de referência de 45 kg/ha dever-se-ia utilizar a rotação de 16,8 rpm para se obter 44,99999 kg/ha, bem como para o valor de referência de 85 kg/ha dever-se-ia utilizar a rotação de 31,73333 rpm para se obter 84,99999 kg/ha. Portanto, como fica bastante complicado trabalhar com esse ajuste de rotação em virtude de já existir erro no mapeamento de aplicação e no deslocamento da máquina que foi considerado constante, pois pode haver patinação na roda da máquina de arraste.

Tendo em vista a pouca disponibilidade, para este trabalho, de mapas de aplicação de fertilizantes com maior variação de necessidade de adubo, fez-se o levantamento da curva teórica variando a rotação de um em um rpm versus q_{Fd} (teórica), juntamente com os resultados experimentais da variação da rotação de quatro em quatro rpm, como mostra o gráfico da Figura 43, verificando a quantidade de fertilizante que o sistema aplicaria durante o tempo de 31 segundos, com o intuito de verificar o comportamento do sistema em controlar a quantidade de fertilizante em taxas variáveis.

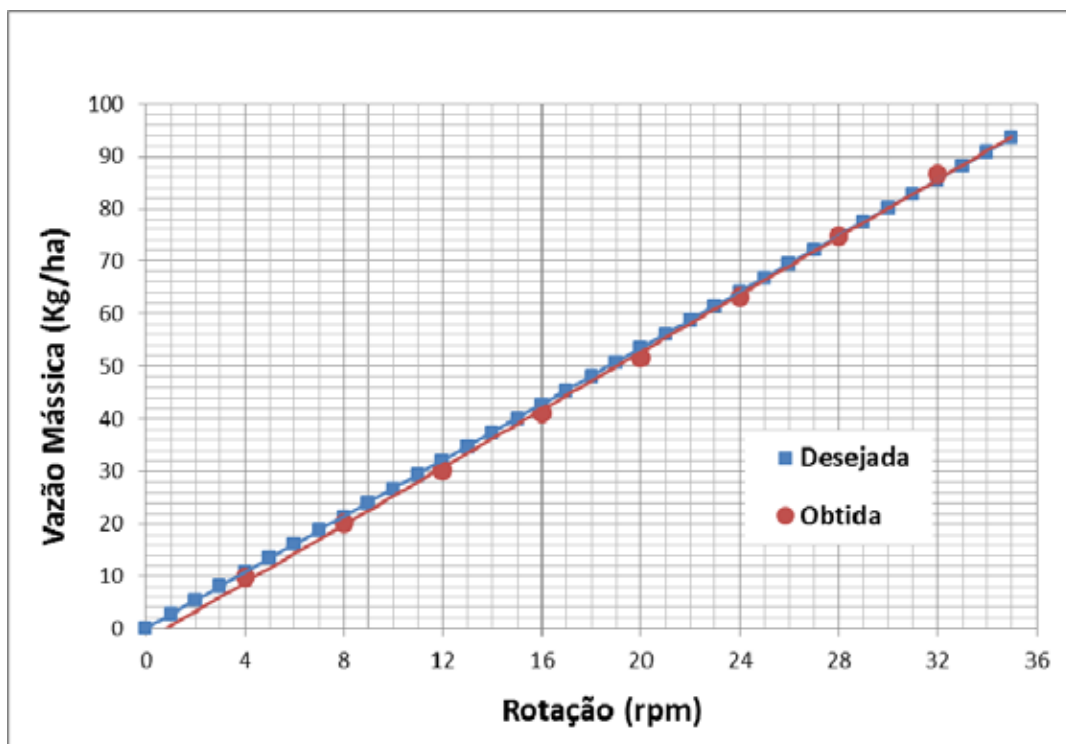


Figura 43 - Gráfico da Rotação do Dosador versus Vazão Mássica.

Os testes realizados mostraram no gráfico da Figura 44, que o dosador tem uma tendência de erro de aplicação maior em baixas rotações, fato já mencionado em um trabalho publicado por Martins (1999), onde o autor afirma que o dosador do tipo helicoidal quando opera com rotações mais elevadas, apresenta uma diminuição no intervalo entre os picos de máximas e mínimas quantidades aplicadas. Isto indica que projetos de dosadores helicoidais que operem a rotações mais elevadas podem apresentar uma característica de dosagem mais uniforme. Comparando com o trabalho de Yuan *et al.* (2010), nota-se uma discreta semelhança no comportamento da curva do gráfico do erro da fertilização em relação a vazão mássica do equipamento, embora o autor tenha utilizado para os testes um dosador do tipo rolo de pregas.

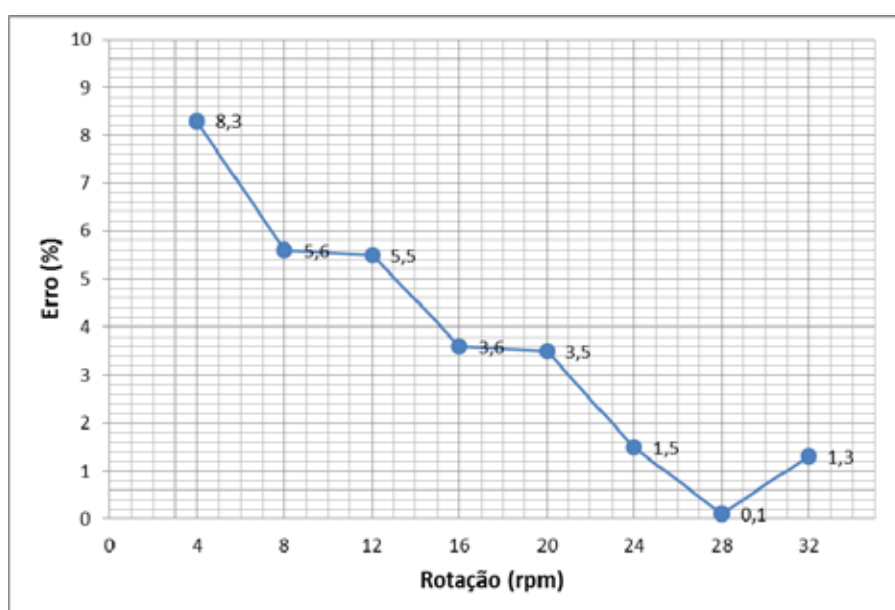


Figura 44 - Erro de aplicação versus rotação do dosador.

Comparando os valores de referência em relação aos valores experimentais, constata-se que o erro para menos na aplicação de fertilizante é da ordem de 3,56% em relação ao valor de referência de 45 kg/ha e apresenta erro de 1,78% para mais na aplicação de fertilizante para o valor de referência de 85 kg/ha. Nota-se também que o menor erro de aplicação foi observado quando a rotação esteve configurada entre 26 e 30rpm, pois nessa faixa o erro entre a vazão mássica teórica e a real foi menor que 1%.

Com os valores ainda obtidos nos ensaios de controle PID sem carga foi plotado um gráfico da variação da rotação de três em três rpm, porém com a frequência de 100 Hz do PWM para rotação máxima de 105rpm do motor, com uma relação transmissão de 3:1 do motor para o dosador. Portanto a rotação do dosador passou a ser máxima de 35rpm variando de um em um rpm, como mostra a Figura 45 e 46 da rotação e da ação de controle respectivamente, nota-se que a variação da vazão teórica vai de 2,6 a 93,7 Kg/ha de produto.

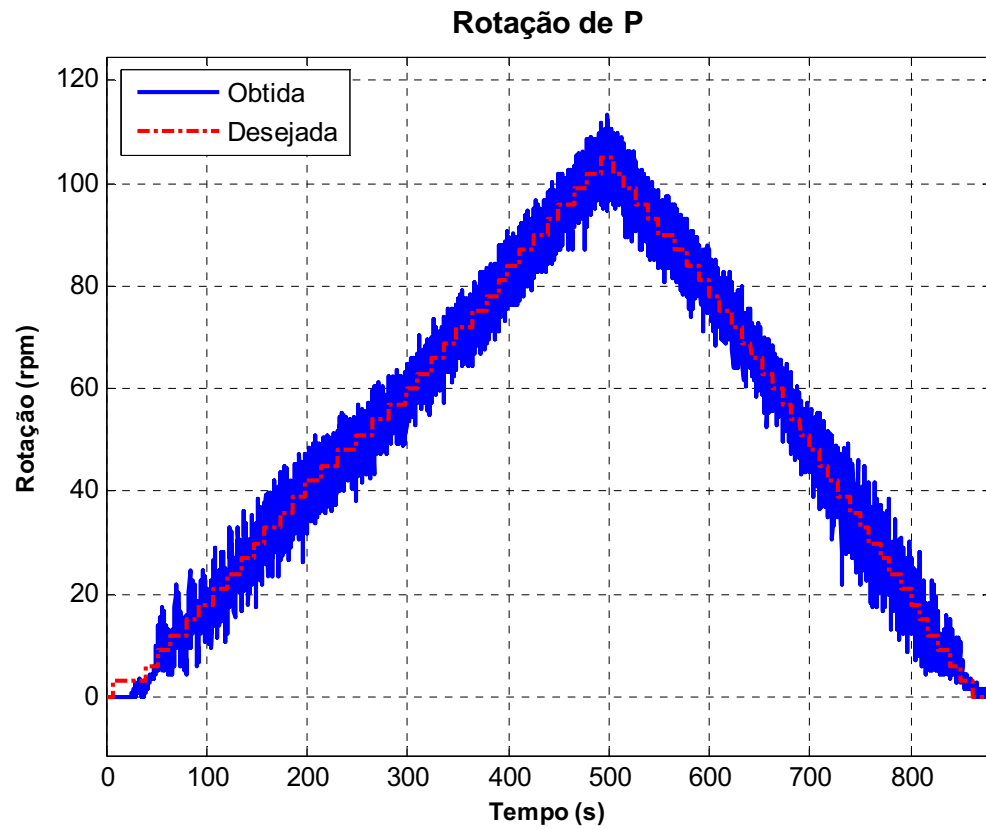


Figura 45 - Gráfico da Rotação do Motor 100Hz do PWM (Variação de 3rpm).

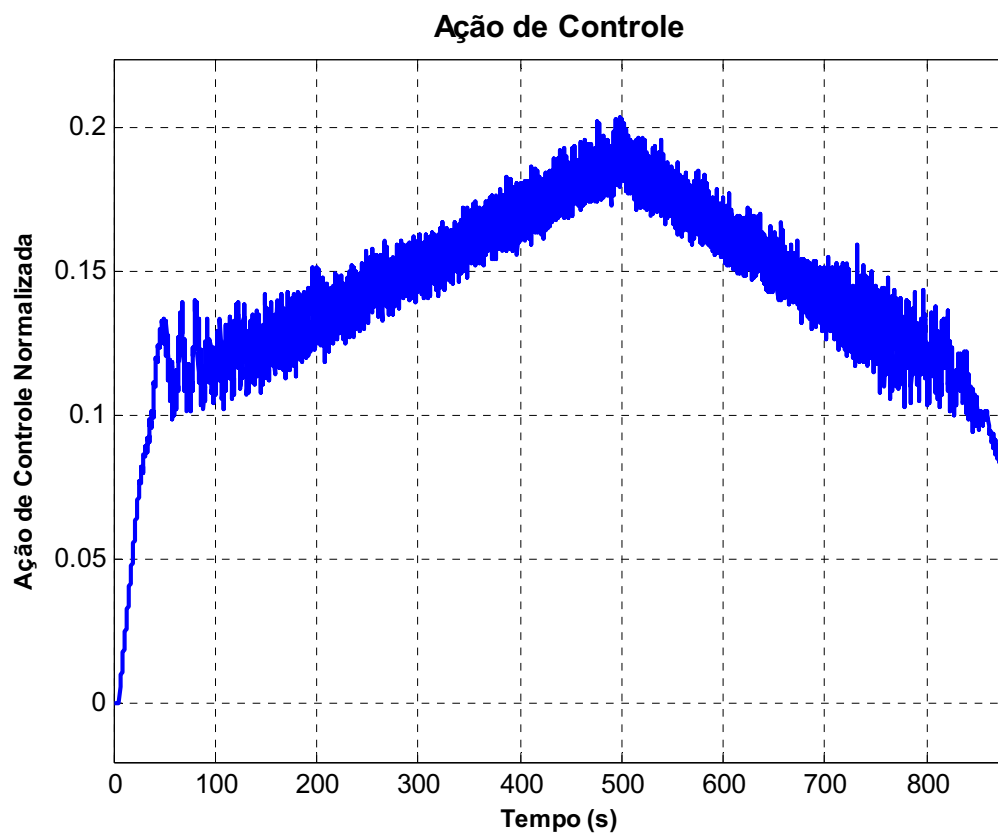


Figura 46 - Gráfico da Ação de Controle do Motor 100Hz do PWM (Variação de 3rpm).

6 CONCLUSÕES

Ao final deste trabalho pode-se concluir que:

O protótipo testado mostrou-se eficiente na aplicação de produto em taxa variável e com precisão adequada, podendo ser utilizado na aplicação de fertilizante de baixa, média e alta vazão, dependendo do controle da rotação do dosador.

O aplicativo computacional desenvolvido conseguiu controlar o equipamento para a variação da rotação e manteve uma boa linearidade entre a tensão do PWM aplicada e a rotação do motor.

A metodologia empregada para avaliação do protótipo foi adequada. O sistema de aquisição de dados e processamento de sinais foi apropriado e permitiu o registro de dados de forma prática e rápida.

Apesar das oscilações oriundas do sistema, estas não prejudicaram o funcionamento do controle da dosagem, nos testes realizados percebeu-se a possibilidade da utilização do sistema na aplicação simultânea de outros produtos.

O sistema de taxa variável permite a dosagem e aplicação do produto com maior precisão, evitando assim o desperdício. Foi observado também nos testes que existe um erro de aplicação, porém sem comprometer o funcionamento e que ele tende a aumentar com a diminuição da vazão.

7 TRABALHOS FUTUROS

Como perspectiva de estudos futuros serão elencadas várias sugestões que poderão ser implementadas para melhoria do funcionamento e aumento da eficácia do protótipo.

Sugere-se estudar a troca dos motores elétricos por outros mais potentes e robustos com transmissão planetária de baixa rotação e alto torque, com o objetivo de verificar o comportamento da dosagem em baixas rotações.

Sugere-se analisar a possibilidade de acoplar logo abaixo do dosador, no duto de saída para o solo, um sensor de massa para poder mensurar a vazão de maneira dinâmica, ou seja, ao mesmo tempo em que o produto está sendo aplicado, fazendo com que o erro de aplicação seja minimizado, pois acredita-se permitir ao sistema um melhor controle da vazão.

Sugere-se implementar ao sistema uma placa de aquisição que utilize um número maior de contadores, possibilitando o controle dos três motores ao mesmo tempo fazendo assim a verificação do sistema com os produtos sendo aplicados simultaneamente.

Deve-se implantar o sistema em uma semeadora-adubadora de plantio direto, fazendo-se as devidas adaptações no chassi e no tanque de armazenagem de fertilizante da mesma e utilizá-la em testes a campo para comprovação da eficácia do sistema.

Deve-se elaborar e implementar um software dedicado para que o equipamento possa ser utilizado em testes experimentais a campo, sem a necessidade da utilização do software de simulação virtual (LabVIEW®), que inviabiliza o sistema pelo custo elevado e dificuldade de transporte e uso a campo.

REFERÊNCIAS

- ANDA, Associação Nacional para Difusão de Adubos. **O uso eficiente de fertilizantes e corretivos agrícolas**. São Paulo, 2000.
- ANTUNIASSI, U. R. **Avaliação de sistema de injeção de defensivos para utilização em agricultura de precisão**. 1999. 87f. Tese (Livre Docência) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista. Botucatu, 1999.
- BALASTREIRE, L. A.; ELIAS, A. I.; AMARAL, J. R. **Agricultura de Precisão: mapeamento da produtividade da cultura do milho**. Engenharia Rural, Piracicaba, v. 8, n. 1, p. 97-111, 1997.
- BALASTREIRE, L. A. **A experiência com pesquisas em Agricultura de Precisão na ESALQ-USP**. In: congresso e feira para usuários de geoprocessamento da América Latina, 4., 1998, Curitiba. Anais. Curitiba: Microservice, 1998.
- BALASTREIRE, L. A. **Potencial do uso da agricultura de precisão no Brasil**. In: II Encontro paulista de soja. Campinas, p. 176-217, 2000.
- BARBIERI, D. M.; JÚNIOR, J. M.; PEREIRA, G. T. **Variabilidade espacial de atributos químicos de um argissolo para aplicação de insumos à taxa variável em diferentes formas de relevo**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.28, n.4, p.645-653, 2008.
- BISHOP, R. H; **National Instruments**. Learning with LabVIEW 8. 2007 by Pearson Education, inc. Upper Saddle River, NJ07458.
- BLACKMORE, B. S.; GRIEPENTROG, H.; FOUNTAS, S.; and GEMTOS, T. **A Specification for an Autonomous Crop Production Mechanization System**. Agricultural Engineering International: the CIGR E journal. Manuscript PM 06 032. Vol. IX. 2007.
- CAPELLI, N. L. **Agricultura de Precisão - Novas Tecnologias para o Processo Produtivo**. LIE/DMAQAG/FEAGRI/UNICAMP, 1999. Disponível na Internet .<http://www.bases.cnptia.embrapa.br/cria/gip/gipap/capelli.doc>, em 15 Out. 1999.
- DELLAMEA, R. B. C.; AMADO, T. J. C.; BELLÉ, G. L.; LONDERO, G. T.; DONDÉ, R. J. **Agricultura de precisão voltada à melhoria da fertilidade do solo no sistema plantio direto**. XXXI Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. De 05 a 10 de Agosto de 2007, Gramado RS.
- DODERMANN, A.; PING, J.L. **Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps**. Agronomy Journal, Madison, v.96, n.1, p.285-297, 2004.

DOERGE, T. A. **Management zone concepts. Site-Specific management guidelines.** 2000. Disponível em: <<http://www.farmresearch.com/ssmg/ssmg-02/002-print.ftm>> Engel, R.; Long, D.; Carlson, G. On-the-go grain protein sensing is near. Does it have a future in precision nitrogen management for wheat? Better Crops, Norcross, v. 81, n. 4, p. 20-23, 1997.

FARNHAM, D. E. **Site-specific crop management: what have we learned and where do we go from here?** Ames: Iowa State University-Department of Agronomy, 2000. 6 p.

FERTIZA – **Manual Técnico**, São Paulo – SP. Impresso em junho de 1996.

FRAISSE, C; FAORO, L. **Agricultura de Precisão: A tecnologia de GIS/GPS chega às fazendas.** Revista Fator GIS, Curitiba, n.21, p. 28-33, 1998.

FRESCO, L. O. **Agro-ecological knowledge at different scales.** Pp. 133-141 in EcoRegional Approaches for Sustainable Land Use and Food Production, J. Bouma, A. Kuyvenhaven, B. H. A. M. Bouman, J. C. Luyten, and H. G. Zandstra, eds. Dordrecht, The Netherlands: Kluwer Academic Publisher. 1995.

GOERING, C. E. **Recycling a concept.** Agricultural Engineering, St. Joseph, v. 65, n. 6, p. 25, 1993.

JOHN DEERE. Disponível na Internet: <http://www.deere.com.br>. Acesso em: 03 novembro 2009.

LEE, W. S.; ALCHANATIS, V.; YANG, C.; HIRAFUJI, M.; MOSHOU, D.; LI, C. **Sensing technologies for precision specialty crop production.** Computers and Electronics in Agriculture. 74, 2-33, 2010.

LUZ, P. H. DE C.; OTTO, R; VITTI, G. C.; QUINTINO, T. A.; ALTRAN, W. S.; IKEDA, R. **Otimização da aplicação de corretivos agrícolas e fertilizantes.** IPNI – International Plant Nutrition Institute, Informações Agronômicas, n. 129, março, 2010.

MARCHESAN (TATU). Disponível na Internet: <http://www.marchesan.com.br>. Acesso em: 03 de novembro 2009.

MARTINS, M. M. **Desenvolvimento de um dosador helicoidal visando sua utilização em equipamentos de aplicação localizada de fertilizantes sólidos.** Campinas: UNICAMP, 1999. Dissertação de Mestrado.

MELLO, B. A.; CAIMI, L. L. **Simulação na validação de sistemas computacionais para a agricultura de precisão.** Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental. v.12. n.6. p.666–675, 2008.

MENEGATTI, F. A. **Desenvolvimento de um Sistema de Dosagem de Fertilizantes para Agricultura de Precisão.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Curso de

Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.

MOLIN, J. P. **Agricultura de precisão. Parte 1: o que é estado da arte em sensoriamento.** Engenharia Agrícola, v. 17, n. 2, p. 97-107, 1997. Disponível em: <<http://br.monografias.com/trabalhos901/agricultura-precisao-sensoriamento / agricultura precisaosensoriamento.pdf>>. Acesso em: 13 junho 2009.

MOLIN, J. P. **A realidade de hoje na agricultura de precisão.** Informativo da Fundação ABC, Castro, p. 4-6, 2001.

MOLIN, J. P. **Fatores restritivos à adoção da agricultura de precisão.** In: Anais do II Congresso Brasileiro de Soja e Mercosoja. Foz do Iguaçu, PR, jun., 2002.

MOLIN, J. P. **Tendências da agricultura de precisão no Brasil.** Congresso Brasileiro de Agricultura de Precisão. Piracicaba – SP, 2004.

MOLIN, J. P. **Agricultura de Precisão – O gerenciamento da variabilidade,** ESALQ/USP, 83 p. Piracicaba – SP. 2008.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno.** 4.ed. São Paulo: Prentice Hall do Brasil, 2003. 788p.

PIRES, J.L.F.; CUNHA, G.R.; PASINATO, A.; FRANÇA, S.; RAMBO, L. **Discutindo Agricultura de Precisão – Aspectos Gerais.** Passo Fundo: EMBRAPA TRIGO, 2004. 18p. html. (Embrapa Trigo. Documento online; 42). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do42.pdf>. Acesso em: 04 abril 2009.

SANTI, A. L; AMADO T. J. C; DELLA FLORA, L. P. & SMANIOTTO, R. F. F. **Revista Plantio Direto**, RS, Aldeia Norte Editora, 2009, ed. 109, Passo Fundo.

SCARLETT, A. J. **Integrated control of agricultural tractors and implements: a review of potential opportunities relating to cultivation and crop establishment machinery.** Computers and Electronics in Agriculture, Amsterdam, v.30, n.1-3, p.167-191, 2001.

SERRANA: **Agricultura de Precisão.** Boletim Informativo, julho de 2004. Disponível em: <http://www.serrana.com.br>. Acesso em: 02 de abr. 2007.

SERRANO, J. M.; PEÇA, M. J. O.; SILVA, J. R.; SERRAZINA, H.; MENDES, J. **Avaliação de um distribuidor centrífugo de adubo na perspectiva de utilização em agricultura de precisão.** Revista de Ciências Agrárias 30(1): 79-86, TAB. 2007.

SHIRATSUCHI, L. S.; RESENDE, A.V. **Embrapa Cerrados**, Planaltina – DF. 2007. Disponível em: <http://www.cpac.embrapa.br/publicações>. Acesso em: 02 junho 2008.

SILVA, C. B. **Inovação na indústria sucroalcooleira paulista: os determinantes da adoção das tecnologias de agricultura de precisão.** 2009. 89 p. Tese (Doutorado em

Economia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz (ESALQ), Piracicaba, 2009. Disponível em: < <http://www.geoprocessamento.net/modules/news/article.php?storyid=350>>. Acesso em: 29 agosto 2009.

SUDDUTH, K. A. **Engineering Technologies for Precision Farming**. In: International Seminar on Agricultural Mechanization Technology for Precision Farming, 1999, suwon. anais...1999.

TABILE, R. A.; GODOY, E. P.; PEREIRA, R. R. D.; TANGERINO, G. T.; PORTO, A. J. V.; INAMASU, R. Y. **Projeto e desenvolvimento da arquitetura de um robô agrícola móvel**. Engenharia Agrícola, Jaboticabal, v.31, n.1, p.130-142, 2011.

TSCHIEDEL, M.; FERREIRA, M. F. **Introdução à agricultura de precisão: conceitos e vantagens**. Ciência Rural, Santa Maria, v.32, n.1, p.159-163, 2002.

UMEZU, C. K. **Sistema de controle de um equipamento de formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis**. Campinas: UNICAMP, 2003. 171p. Tese Doutorado.

UMEZU, C. K.; CAPPELLI, N. L. **Desenvolvimento e avaliação de um controlador eletrônico para equipamentos de aplicação de insumos**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.10, n.1, p.225–230, 2006.

WERNER, V.; SCHLOSSER, J. F.; ROZIN, D.; PINHEIRO, E. D.; DORNELLES, M. E. C. **Aplicação de fertilizantes a taxa variável em agricultura de precisão variando a velocidade de deslocamento**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v.11, n.6, p.658–663, 2007.

YUAN, J.; CHENG, L. L.; YAN, M. L.; QINGBING, Z.; XUAN, F. Z. **Gaussian processes based bivariate control parameters optimization of variable-rate granular fertilizer applicator**. Computers and Electronics in Agriculture. 70, 33-41, 2010.

ZULLI, M. R. Seminário Aprosoja: **Agricultura de precisão – Racionalizando Custos**. Tangará da Serra, MT. Ano, 2008. Disponível em: <http://www.aprosoja.com.br>. Acesso em: 26 de abr. 2009.