

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE ELETRO-
MECÂNICO PARA DOSADOR DE FERTILIZANTES**

ANGEL PONTIN GARCIA

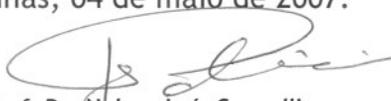
**CAMPINAS-SP
FEVEREIRO DE 2007**



PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da Dissertação de Mestrado defendida por **Angel Pontin Garcia**, aprovada pela Comissão Julgadora em 16 de fevereiro de 2007.

Campinas, 04 de maio de 2007.


p/ Prof. Dr. Nelson Luís Cappelli
Presidente

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE CONTROLE ELETRO-
MECÂNICO PARA DOSADOR DE FERTILIZANTES**

*Dissertação de mestrado submetida à banca
examinadora para obtenção do título de mestre em
Engenharia Agrícola na área de concentração em
Máquinas Agrícolas.*

ANGEL PONTIN GARCIA

Orientador: Nelson Luis Cappelli

**CAMPINAS-SP
FEVEREIRO DE 2007**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

G165d Garcia, Angel Pontin
Desenvolvimento de um sistema de controle eletro-
mecânico para dosador de fertilizantes / Angel Pontin
Garcia. --Campinas, SP: [s.n.], 2007.

Orientador: Nelson Luis Cappelli
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Máquinas agrícolas. 2. Agricultura - Mecanização.
3. Plantio direto. 4. Sistemas de comando e controle. 4.
Sistemas de comando e controle. 5. Adubos e
fertilizantes – Aplicação. I. Cappelli, Nelson Luis. II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Agrícola. III. Título.

Título em Inglês: Development of an electro-mechanical control system for
fertilizer distributor.

Palavras-chave em Inglês: Fertilizer-grain drill, Farm machinery,
Microcontroller

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola.

Banca examinadora: Claudio Kiyoshi Umezu e Ruy Casão Junior

Data da defesa: 16/02/2007

Programa de Pós-Graduação: Engenharia Agrícola

“O homem é tão bom quanto seu desenvolvimento tecnológico o permite ser”

George Orwell

Aos meus pais Angel Garcia Carrera e Eliana Pontin Garcia e a minha irmã Adriana, pelo total apoio, amor e carinho que sempre tiveram por mim.

À minha mulher Gabriela e minha filha Marina pelo amor e apoio.

Dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Gostaria aqui de agradecer a todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram, não só para a realização deste trabalho em especial, mas sim, da construção de todo este processo que me trouxe até aqui.

Ao meu orientador e amigo Prof. Dr. **NELSON LUIS CAPPELLI**, pela oportunidade, confiança e amizade nesta etapa de minha vida;

Ao Prof. Dr. **CLÁUDIO KIYOSHI UMEZU**, pelos ensinamentos e constante colaboração em todas as partes deste trabalho;

Aos professores da UNICAMP, tanto na graduação como na pós-graduação. Em especial aos professores: **ANTÔNIO CARLOS DE OLIVEIRA FERRAZ, ANTONIO JOSÉ DA SILVA MACIEL, INACIO MARIA DAL FABBRO, KIL JIN PARK, MAURO TEREZO, PAULO S. G. MAGALHÃES**, pelos valiosos ensinamentos;

Aos alunos de iniciação científica que tanto ajudaram na realização do projeto: **JOÃO LUÍS PIROLA E LEONARDO HENRIQUE ROBERTO**;

Aos amigos e colaboradores, membros da equipe de pesquisadores do Laboratório de Instrumentação e Controle: **ANDRÉ JOHANN, DANIEL GAIESKI, EDISON RUSSO, THALES LIMA**;

À **TODOS** meus amigos e grandes companheiros de graduação da pós-graduação: **ANNA LETÍCIA PIGHINELLI, DANIEL ALBIERO, RAFAEL AUGUSTUS DE OLIVEIRA, JULIANA SARUBBI, ODAIL PAGLIARDI**.

Aos meus grandes amigos de Campinas: **RICARDO RANGEL BARRETO, ELLEN BRAGATTO, GUSTAVO GARCIA RIGOLIN, CAMILA CARNEIRO DIAS, RENATA CRISTINA O. M. ZAGO**.

Aos meus grandes amigos de São Paulo: **ALEXANDRE F. REIS, FERNANDO HADDADI, RODRIGO COSENTINO TIBÉRIO.**

Aos **funcionários da Faculdade de Engenharia Agrícola da UNICAMP**, sempre prontos para colaborar com todos os alunos desta instituição.

Finalmente, agradeço à **Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)**, por ter financiado, nestes dois anos meus estudos de mestrado.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS _____	x
LISTA DE TABELAS _____	xiii
RESUMO _____	xv
ABSTRACT _____	xvii
<u>1 INTRODUÇÃO</u> _____	1
<u>2 OBJETIVOS</u> _____	3
2.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS _____	3
<u>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</u> _____	4
3.1 SISTEMAS DE APLICAÇÃO DE FERTILIZANTES SÓLIDOS _____	4
3.1.1 SISTEMA HELICOIDAL _____	5
3.1.2 SISTEMA DE ROTORES DENTADOS _____	5
3.1.3 SISTEMA DE DISCOS HORIZONTAIS ROTATIVOS _____	6
3.1.4 SISTEMA DE ROTOR VERTICAL IMPULSADOR _____	7
3.1.5 SISTEMA DE CORREIAS OU CORRENTES _____	7
3.2 IMPORTÂNCIA DA APLICAÇÃO UNIFORME DE FERTILIZANTES _____	8
3.2.1 FATORES QUE INFLUENCIAM A QUALIDADE DE APLICAÇÃO DE FERTILIZANTE _____	11
3.2.1.1 Tipo de fertilizante _____	11
3.2.1.2 Velocidade de deslocamento do equipamento _____	13
3.2.1.3 Nível do reservatório _____	13
3.2.1.4 Mecanismo de acionamento _____	15
3.3 UTILIZAÇÃO DE CONTROLADORES E EQUIPAMENTOS ELETRÔNICOS NA AGRICULTURA _____	16
3.3.1 UTILIZAÇÃO DE SISTEMAS DE CONTROLE ELETROME CÂNICOS EM DOSADORES DE FERTILIZANTES SÓLIDOS _____	18
<u>4 MATERIAL E MÉTODOS</u> _____	26
4.1 CONCEPÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE PROPOSTO _____	26
4.1.1 FLUXOGRAMA DE OPERAÇÃO DO SISTEMA DE CONTROLE _____	27
4.1.2 CONFIGURAÇÃO INICIAL DO SISTEMA _____	28
4.1.2.1 Taxa de aplicação _____	29

4.1.2.2	Formulação do fertilizante _____	29
4.1.2.3	Espaçamento entre linhas _____	30
4.1.2.4	Velocidade de deslocamento do equipamento _____	30
4.2	ETAPAS DO PROJETO _____	30
4.3	CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES FÍSICAS DO FERTILIZANTE _____	31
4.3.1	GRANULOMETRIA E DIÂMETRO MÉDIO DOS GRÂNULOS _____	31
4.3.2	DENSIDADE APARENTE E DENSIDADE REAL _____	32
4.3.3	ÂNGULO DE TALUDE _____	33
4.4	DEFINIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DO DOSADOR DE FERTILIZANTE _____	33
4.4.1	MATERIAL _____	33
4.4.1.1	Mecanismo dosador de fertilizante _____	33
4.4.1.2	Velocidade de deslocamento _____	34
4.4.1.3	Microcontrolador _____	34
4.4.1.4	Placa de desenvolvimento _____	35
4.4.1.5	Rotação do motor de acionamento do dosador _____	36
4.4.1.6	Circuito de potência _____	36
4.4.1.7	Motorreductor de corrente contínua _____	37
4.4.2	PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL _____	40
4.4.2.1	Planejamento Experimental do Modelo do Dosador de Fertilizante _____	40
4.4.2.1.1	Planejamento fatorial _____	41
4.4.2.1.2	Planejamento central composto - Linear _____	43
4.4.2.1.3	Planejamento central composto - Quadrático _____	47
4.4.2.1.4	Cálculo dos coeficientes dos modelos matemáticos _____	49
4.4.2.1.5	Análise de variância _____	50
4.4.2.1.6	Significância estatística da regressão _____	52
4.5	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS _____	53
4.5.1	SISTEMA FÍSICO DE AQUISIÇÃO _____	53
4.5.2	CALIBRAÇÃO DE CÉLULA DE CARGA _____	54
4.6	DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA DE CONTROLE DO SISTEMA DE DOSAGEM _____	54
4.6.1	DISPLAY LCD _____	55
4.6.2	TECLADO MATRICIAL _____	56
4.6.3	AQUISIÇÃO DO SINAL DE VELOCIDADE DE DESLOCAMENTO _____	57
4.6.4	SINAL DE CONTROLE - PWM _____	58
4.7	AVALIAÇÕES DO PROTÓTIPO _____	59
4.7.1	TESTE PRELIMINAR _____	60
4.7.2	TESTE DE LABORATÓRIO _____	60
4.7.2.1	Teste estático _____	61
4.7.2.2	Teste dinâmico _____	62
4.7.3	FORMA DE ANÁLISE DOS RESULTADOS _____	63
4.7.3.1	Análise dos dados obtidos _____	63
4.7.3.2	Custos de Produção _____	64
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO _____	65

5.1	PROPRIEDADES DAS MATÉRIAS-PRIMAS	65
5.2	MODELAGEM MATEMÁTICA DO DOSADOR DE FERTILIZANTE	67
5.2.1	MODELO MATEMÁTICO FATORIAL	69
5.2.2	MODELO MATEMÁTICO CENTRAL COMPOSTO - LINEAR	72
5.2.3	MODELO MATEMÁTICO CENTRAL COMPOSTO - QUADRÁTICO	75
5.2.4	DEFINIÇÃO DO MODELO UTILIZADO	78
5.3	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS	79
5.3.1	PROGRAMA DE AQUISIÇÃO	79
5.3.2	SISTEMA FÍSICO DE AQUISIÇÃO	80
5.3.3	CALIBRAÇÃO	81
5.4	PROTÓTIPO DO SISTEMA DE CONTROLE	82
5.4.1	PROGRAMA DE CONTROLE DO SISTEMA DE DOSAGEM	82
5.4.2	AVALIAÇÃO DO PROTÓTIPO	83
5.4.2.1	Ensaio preliminar	83
5.4.2.2	Teste Estático	85
5.4.2.3	Teste dinâmico	88
5.5	CUSTO DOS EQUIPAMENTOS	91
6	CONCLUSÕES	93
7	BIBLIOGRAFIA	94

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1: Dosador helicoidal para adubo. 1 –sistema de transmissão, 2 – helicóide do dosador (BALASTREIRE, 1987)</i>	5
<i>Figura 2: Dosador de rotor dentado para adubo. 1 - rotor dentado, 2 - lingüeta ajustável (BALASTREIRE, 1987)</i>	6
<i>Figura 3: Dosador de adubo de disco horizontal rotativo. 1 - disco, 2 - lingüeta raspadora, 3 - orifício de saída, 4 - base (BALASTREIRE, 1987)</i>	6
<i>Figura 4: Dosador de adubo de rotor vertical impulsor. 1 - rotor, 2 - eixo, 3 - depósito (BALASTREIRE, 1987)</i>	7
<i>Figura 5: Dosador de adubo de correia. 1 - correia, 2 - agitador, 3 - depósito (BALASTREIRE, 1987)</i>	7
<i>Figura 6: (a) Produtividade da cultura de trigo em função da disponibilidade de Nitrogênio (b) Variação da produtividade em função do coeficiente de variação da taxa de aplicação. (SOGAARD e KIERKEGAARD, 1994)</i>	10
<i>Figura 7: Comparativo entre a distribuição de fertilizante nominal do fabricante e a encontrada experimentalmente para diferentes tipos de dosagem (a) mínima; (b) média; (c) máxima (SCHNEIDER et al., 2005).</i>	12
<i>Figura 8: Médias do produto distribuído por rotação do eixo de acionamento (RT1 a RT7) do dosador em função do nível de fertilizante no reservatório.(FERREIRA et al., 2006)</i>	14
<i>Figura 9: Taxa de aplicação de fertilizante por linha de semeadura (MAHL et al., 2006).</i>	16
<i>Figura 10: Esquema do sistema de controle de um pivô central para irrigação (PALACÍN et al., 2005)</i>	17
<i>Figura 11: Sistema integrado de controle dos implementos (SCARLETT, 2001).</i>	19
<i>Figura 12: Métodos para o controle de profundidade de deposição de sementes. (a) controle manual de profundidade (b) controle automático de profundidade (SCARLETT, 2001).</i>	20
<i>Figura 13: Desenhos esquemáticos: (a) Vista do sistema de acionamento e de medição de fluxo; (b) Detalhe do sensor de fluxo mássico (CAPPELLI et al. 2000).</i>	20
<i>Figura 14: Vazão mássica em função do tempo. (a) Rotação de 40 min⁻¹ no eixo do dosador e (b) Rotação de 120 min⁻¹ no eixo do dosador (CAPPELLI et al. 2000).</i>	21
<i>Figura 15: Diagrama esquemático do sistema de acionamento dos dosadores (UMEZU, 2003)</i>	22
<i>Figura 16: Comportamento dinâmico do sistema para entradas em degraus de rotação (UMEZU, 2003)</i>	22
<i>Figura 17: Gráfico da vazão pela velocidade angular do dosador acanelado (MENEGATTI et al., 2004)</i>	23
<i>Figura 18: Comportamento dinâmico do sistema para entradas em degraus de velocidade angular do eixo de acionamento (MENEGATTI et al., 2004)</i>	23
<i>Figura 19: Diagrama de blocos do Módulo de Interface (RUSSO, 2005)</i>	24

<i>Figura 20: Diagrama de blocos do conjunto de controle da taxa de aplicação proposto</i>	26
<i>Figura 21: Sistema de controle em malha aberta</i>	27
<i>Figura 22: Fluxograma da operação do sistema de controle proposto</i>	28
<i>Figura 23: Representação da organização das rotinas de configuração da formulação do fertilizante</i>	29
<i>Figura 24: Fluxograma das fases de desenvolvimento do projeto</i>	30
<i>Figura 25: Sistema dosador de fertilizante Fertisystem (AGRIMAQ, 2005)</i>	34
<i>Figura 26: Placa de desenvolvimento de aplicações em microcontroladores utilizada no projeto (EXSTO, 2005).</i>	35
<i>Figura 27: Dimensões do motorreductor selecionado (MOTRON, 2005)</i>	40
<i>Figura 28: Decomposição do desvio de uma observação em relação à média global (BARROS NETO, 2005).</i>	51
<i>Figura 29: Esquema da simulação do programa desenvolvido utilizando o software Proteus.</i>	55
<i>Figura 30: Visualização do programa, simulada no software Proteus, do LCD da seqüência de parâmetros requeridos pelo sistema. (1) quantidade de fertilizante; (2) número da cultura; (3) número do fertilizante; (4) espaçamento entre linhas.</i>	56
<i>Figura 31: Esquema eletrônico do teclado matricial (ZANCO, 2006)</i>	56
<i>Figura 32: Visualização da simulação realizada no programa Proteus do sinal de deslocamento do equipamento (a) gerador de sinal; (b) contador de pulsos</i>	58
<i>Figura 33: Visualização da simulação realizada no programa Proteus do sinal PWM gerado pelo microcontrolador e medido por um osciloscópio; (a) sinal PWM; (b) microcontrolador; (c) osciloscópio</i>	59
<i>Figura 34: Esquema da montagem do teste preliminar do sinal de saída do programa de controle</i>	60
<i>Figura 35: Excitação do tipo degrau, expresso em valores de rotação (UMEZU, 2003)</i>	63
<i>Figura 36: Bancada do ensaio de caracterização do modelo matemático do dosador de fertilizante sendo: (a) gerador de sinais; (b) balança; (c) motor de corrente contínua; (d) circuito de potência; (e) reservatório; (f) dosador de fertilizante</i>	68
<i>Figura 37: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros do modelo matemático linear do dosador de fertilizante</i>	72
<i>Figura 38: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros da modelo matemático linear com todos os níveis do dosador de fertilizante.</i>	75
<i>Figura 39: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros da modelo matemático quadrático.</i>	78
<i>Figura 40: Painel frontal do sistema de aquisição de dados</i>	79
<i>Figura 41: Diagrama funcional do sistema (a) sistema de aquisição da célula de carga; (b) sistema de aquisição da frequência do sinal simulação da velocidade; (c) sistema de gravação dos dados; (d) taxa de aquisição de dados em ms.</i>	80
<i>Figura 42: Sistema físico de aquisição: (a) Vista lateral da célula de carga com anteparo; (b) visão em perspectiva</i>	81
<i>Figura 43: Gráfico da curva de calibração da célula de carga utilizada e equação da regressão</i>	82

<i>Figura 44: Esquema do filtro de passa-baixa utilizado no sinal de saída do microcontrolador</i>	83
<i>Figura 45: Sinal PWM de saída do microcontrolador (a) sem filtro; (b) com filtro</i>	84
<i>Figura 46: Gráfico da taxa de aplicação de fertilizante [kg.ha⁻¹] real e a taxa configurada pelo usuário</i>	87
<i>Figura 47: Gráfico da variação do Desvio Médio Relativo em função da velocidade de deslocamento do equipamento</i>	88
<i>Figura 48: Excitação do tipo pulso, valores de velocidade [m.s⁻¹] e tensão de saída [V].</i>	89
<i>Figura 49: Excitação do tipo degrau de subida, valores tensão [V] e velocidade [m.s⁻¹].</i>	90
<i>Figura 50: Excitação do tipo degrau de descida, valores de velocidade [m.s⁻¹] e tensão de saída da célula de carga [g.s⁻¹].</i>	91
<i>Figura 51: Gráfico da participação no custo de cada parte do sistema de controle</i>	92

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 1: Conteúdo de nutrientes em culturas, por tonelada de produto colhido e índices de exportação destes nutrientes nas colheitas</i>	9
<i>Tabela 2: Preço e custos da aplicação de fertilizantes no Brasil, Estados Unidos e França</i>	10
<i>Tabela 3: Taxa de aplicação de fertilizante, em kg.ha⁻¹, em função do nível de fertilizante no reservatório e velocidade de deslocamento do equipamento.</i>	15
<i>Tabela 4: Matérias-primas utilizadas na avaliação do dosador helicoidal (F1 à F3) e de avaliação e validação do sistema de controle (T1)</i>	31
<i>Tabela 5: Características do transistor IRF640 utilizado no circuito de potência</i>	37
<i>Tabela 6: Estimativa da quantidade de nutrientes a ser aplicado nas culturas de feijão, milho, amendoim e arroz em kg.ha⁻¹.</i>	38
<i>Tabela 7: Rotação do eixo do motor em rad.s⁻¹. Entre parênteses estão expressas a rotação em min⁻¹.</i>	38
<i>Tabela 8: Dados obtidos no ensaio preliminar para a determinação da potência e torque requerido pelo dosador de fertilizante</i>	39
<i>Tabela 9: Características técnicas do motorreductor M210-120, marca Motron.</i>	39
<i>Tabela 10 - Níveis e valores absolutos dos fatores. Planejamento linear.</i>	41
<i>Tabela 11 - Resultado do planejamento fatorial 2³ com cinco repetições no nível central.</i>	42
<i>Tabela 12: Níveis e valores absolutos dos fatores. Planejamento central composto - Linear</i>	44
<i>Tabela 13: Planejamento central composto - linear com cinco repetições no nível central.</i>	45
<i>Tabela 14: Níveis e valores absolutos dos fatores. Planejamento central composto -quadrático.</i>	48
<i>Tabela 15 - Planejamento central composto - quadrático com cinco repetições no nível central.</i>	48
<i>Tabela 16: Análise da variância, pelo método de mínimos quadrados, sendo: n_i = número de repetições no nível i; m = número de níveis distintos da variável independente; n = ∑n_i = número total de observações; p = número de parâmetros do modelo.</i>	52
<i>Tabela 17: Granulometria do fertilizante F1 obtida em cada ensaio, a média [g] e a percentagem retida em cada peneira em relação à massa total [%]</i>	65
<i>Tabela 18: Granulometria do fertilizante F2 obtida em cada ensaio, a média [g] e a percentagem retida em cada peneira em relação à massa total [%]</i>	65
<i>Tabela 19: Granulometria do fertilizante F3 obtida em cada ensaio, a média [g] e a percentagem retida em cada peneira em relação à massa total [%]</i>	66
<i>Tabela 20: Granulometria do fertilizante T1 obtida em cada ensaio, a média [g] e a percentagem retida em cada peneira em relação à massa total [%]</i>	66
<i>Tabela 21: Diâmetro médio dos grânulos [mm] para os fertilizantes utilizados nos experimentos</i>	66

<i>Tabela 22: Densidade Aparente [g.ml⁻¹], Densidade Real [g.ml⁻¹], Ângulo de Talude [°] para os fertilizantes utilizados nos experimentos</i>	67
<i>Tabela 23: Densidade Aparente [g.ml⁻¹], Densidade Real [g.ml⁻¹], Ângulo de Talude [°] para o fertilizante utilizado na validação do modelo e testes experimentais.</i>	67
<i>Tabela 24: Dados completos obtidos para o modelo matemático do dosador de fertilizante</i>	68
<i>Tabela 25: Resultados do planejamento fatorial 2³ com ponto central.</i>	69
<i>Tabela 26: Análise de variância para o ajuste, pelo método de mínimos quadrados, do modelo linear.</i>	71
<i>Tabela 27: Teste F de determinação da significância e falta de ajuste do modelo</i>	71
<i>Tabela 28: Resultados do planejamento central composto - linear.</i>	72
<i>Tabela 29: Análise de variância para o ajuste, pelo método de mínimos quadrados, para o modelo central composto - linear.</i>	74
<i>Tabela 30: Teste F de determinação da significância e falta de ajuste do modelo</i>	74
<i>Tabela 31: Resultados do planejamento central composto 2³, modelo quadrático</i>	75
<i>Tabela 32: Análise de variância para o ajuste, pelo método de mínimos quadrados, para o modelo quadrático.</i>	77
<i>Tabela 33: Teste F de determinação da significância e falta de ajuste do modelo</i>	78
<i>Tabela 34: Resultado dos testes de calibração da célula de carga, sinal de saída da célula de carga [V] e fluxo de massa [g.s⁻¹].</i>	81
<i>Tabela 35: Resultado do ensaio preliminar, verificação do sinal gerado pelo microcontrolador.</i>	84
<i>Tabela 36: Resultado do desvio médio relativo (DRM) do duty cycle no sinal de saída para 50, 100 e 200 kg.ha⁻¹ de taxa de aplicação configurada pelo usuário, em função da velocidade (Vel.)</i>	85
<i>Tabela 37: Resultados do DRM para uma taxa de 50 kg.ha⁻¹. Onde m, t e Taxa são a massa [g], o tempo [s] e a taxa de aplicação [kg.ha⁻¹] obtidos em cada teste respectivamente</i>	86
<i>Tabela 38: Resultados do DRM para uma taxa de 100 kg.ha⁻¹. Onde m, t e Taxa são a massa [g], o tempo [s] e a taxa de aplicação [kg.ha⁻¹] obtidos em cada teste, respectivamente</i>	86
<i>Tabela 39: Resultados do DRM para uma taxa de 200 kg.ha⁻¹. Onde m, t e Taxa são a massa [g], o tempo [s] e a taxa de aplicação [kg.ha⁻¹] obtidos em cada teste, respectivamente</i>	86
<i>Tabela 40: Custo de produção do protótipo</i>	91

RESUMO

A utilização do sistema de plantio direto, no Brasil, em grande escala fez com que fosse necessário o desenvolvimento de equipamentos específicos na implementação da cultura. Estes equipamentos são basicamente constituídos de diversos conjuntos mecânicos que realizam as operações de semeadura e dosagem de fertilizante. Contudo, os mecanismos, no que tange a aplicação de fertilizante, se mostram pouco precisos e de difícil regulagem de operação. Sistemas de acionamento elétrico e controle eletrônico seriam uma opção relevante na substituição de certos conjuntos mecânicos existentes de semeadora-adubadora.

Os objetivos básicos deste trabalho foram: projetar, construir e avaliar um conjunto eletromecânico para dosagem de fertilizantes sólidos.

O conjunto de aplicação de fertilizante projetado conta com um sistema controlador que tem a capacidade de variar a velocidade de rotação do motor elétrico conforme se modificam as condições de trabalho. O sistema possui um microcontrolador que, utilizando-se dos dados de velocidade e dos dados configurados pelo operador, é capaz de atuar na velocidade de rotação do motor de acionamento do dosador, com isso aplicando, de maneira controlada, o fertilizante no solo.

Foi realizada a caracterização das propriedades físicas do fertilizante a fim de que os ensaios para definição do modelo matemático do dosador de fertilizantes pudessem ser feitos na bancada de teste. A modelagem matemática deste foi obtida por meio dos modelos: fatorial, central composto - linear e central composto – quadrático.

Para o monitoramento da taxa de aplicação do sistema de controle em tempo real foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados. Este conta com um programa para a aquisição dos dados, desenvolvido em LabView 7. O sistema físico de aquisição foi constituído por uma célula de carga. O processamento dos dados teve por objetivo separar dos sinais originais apenas as informações desejadas sobre o processo.

Com os parâmetros de projeto definidos pode-se desenvolver o programa de controle do sistema. O *software* foi escrito em linguagem C devido à maior facilidade de programação.

No período de desenvolvimento do programa foi utilizado o *software Proteus*, para realizar simulações. Para maior facilidade no desenvolvimento do *software* optou-se em dividi-lo em partes menores. Posteriormente, com as partes desenvolvidas foi implementado todo o sistema em um único programa.

Durante a realização do teste preliminar de avaliação do protótipo observou-se que o sinal de saída (PWM) apresenta uma componente de alta frequência que pode influenciar no funcionamento do sistema de controle. Com o intuito de reduzir tal sinal alta frequência foi dimensionado um filtro do tipo passa-baixa.

No teste estático o valor de desvio médio relativo (DRM) se apresentou adequado, com valores entre 0,8 e 11,4 % para o sistema operando com uma taxa de aplicação de 100 e 50 kg.ha⁻¹ respectivamente.

Por meio do teste dinâmico pôde-se verificar que o equipamento respondeu de forma adequada ao sinal de excitação. Desta forma, o sistema de controle atuou de forma rápida à possíveis variações de velocidade.

O protótipo desenvolvido satisfaz as condições pré-estabelecidas e se mostrou um equipamento robusto e de fácil operação.

O aplicativo computacional desenvolvido conseguiu, de forma adequada, controlar o mecanismo de dosagem de fertilizante.

PALAVRAS CHAVE: semeadora – adubadora, máquinas agrícolas, microcontrolador

ABSTRACT

In Brazil, the use of no-tillage system in large-scale made with the development of a specific equipment in the implementation of the culture very necessary. These equipments are basically constituted of many mechanical sets that carry through the operations of seed plantation and fertilizer dosage. However, the mechanisms, which refer to the fertilizer application, showed less precision and more difficult regulation of operation. Systems of electric power demand and electronic control would be an excellent option in the substitution of some existing mechanical sets of sowing-fertilizer distributor. The basic goals of this study were to project, to construct and to evaluate an electromechanical set for dosage of solid fertilizers. The fertilizer set application project had a controlling system that had the capacity to change the speed of rotation of the electric engine as modifies the work conditions. The system has a microcontroller that, using the data of speed and the data configured by operator, is capable to act in the speed of rotation of the engine of power demand of the fertilizer, with this applying, in controlled way, the fertilizer in the ground. It was made the characterization of the physical properties of the fertilizer so that the assays for definition of the mathematical model of the fertilizer distributor could be made in the test table. The mathematical modeling of this was gotten by factorial, composed central office - linear and central composition – quadratic models. For the monitoring of the application tax of the control system in real time it was developed a system of acquisition of data. This system had, initially, one program for the data acquisition, developed in LabView 7. The physical system of acquisition was constituted by a load cell. The processing of the data had the goal to separate from the original signals only the information desired about the process. With the defined project parameters the program of control of the system could be developed. Software was written in language C because it was easier for programming. In the period of development of the program it was used Proteus software, to carry through simulation. For easiness in the development of software, it was divided it in lesser parts. Later, with the parts developed the system was implemented in an only program. During the accomplishment of the evaluation preliminary test of the archetype, it was observed an exit signal (PWM) presents one component of high

frequency that can influence in the functioning of the control system. With intention to reduce such high frequency signal, it was created a low-pass filter. In the static test the DRM value was 0,8 to 11,4 % for the operate system application rate of 100 e 50 kg.ha⁻¹ respectively. In the dynamic test the equipment showed a suitable behavior with the excitation sign. The control system had a fast action with speed changes. The prototype developed fulfilled the initial conditions and were considered robust equipment for easy utilization. The software developed was succeed in controlling the fertilizer dosage.

KEY WORDS: fertilizer-grain drill, farm machinery, microcontroller.

1 INTRODUÇÃO

A utilização do sistema de plantio direto, no Brasil, é amplamente difundida, principalmente entre os produtores de grãos. Segundo a FEBRAPDP¹ (2006), a área cultivada no país, que utiliza o sistema de plantio direto, safra 2000/2001, representa aproximadamente 17,4 milhões de hectares, isto é, cerca de aproximadamente 40% da área de lavouras temporárias.

No sistema de plantio direto é necessária a utilização de um equipamento específico na implementação da cultura. Com isso, houve a necessidade de alterações na concepção das máquinas que eram comumente utilizadas no sistema de produção convencional, este equipamento utilizado neste tipo prática é denominado de semeadora-adubadora. BALASTREIRE (1987) define este tipo de implemento como máquinas que têm a função de colocar simultaneamente a semente e o fertilizante no solo. Segundo SILVEIRA (1989), existe um grande número de modelos de semeadoras-adubadoras disponíveis no mercado. SILVA (2003), em seu trabalho, observou que treze empresas estudadas detêm aproximadamente 90% dos modelos fabricados, o que representa um total de 278 modelos analisados. Este grande número e modelos se deve as diferentes combinações entre o número de linhas, o espaçamento entre linhas das culturas e pela potência requerida de tração do trator. Os menores modelos variam de duas a seis linhas; os médios de quatro a oito linhas; e os modelos considerados grandes podem atingir vinte linhas.

No que tange ao mecanismo de aplicação de fertilizantes, o sistema é composto por um mecanismo dosador, que tem a função de deslocar um determinado volume de fertilizante, pré-estabelecido pelo usuário, do reservatório até a saída de mecanismo que o encaminha até o sulco de plantio. Este mecanismo é acionado por uma “roda de terra” que, por meio de um sistema de engrenagens, correias ou corrente, transmite potência ao conjunto dosador. O sistema de acionamento por meio de roda de terra tem a capacidade de manter a taxa de aplicação constante, mesmo quando há uma variação da velocidade de deslocamento do

¹ Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha

conjunto (SHIPPEN *et al.*, 1980). No entanto, em estudo realizado por SCHNEIDER *et al.* (2005) se verificou que, com o aumento da velocidade a quantidade de fertilizantes depositada no solo diminui. Além disso, verificou-se que as tabelas de orientações de adubação contidas nas semeadoras-adubadoras não correspondem aos dados obtidos experimentalmente. Isso pode acarretar uma série de implicações, tais como: o excesso na aplicação de fertilizantes, prejudicial às plantas e ao meio ambiente, além do gasto desnecessário de produto. Já a falta, pode resultar em decréscimo na produtividade, devido à deficiência de nutrientes (MIALHE, 1996). Além disso, SOGAARD e KIERKEGAARD (1994) verificaram que a desuniformidade da taxa de aplicação de fertilizante resulta na perda de produtividade da cultura.

A utilização de sistemas de acionamento elétrico e controle eletrônico se mostra como uma opção relevante na substituição dos mecanismos existentes. Em estudo realizado por MENEGATTI *et al.* (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 sistema dosador foi de no máximo 3%, verificando um grande potencial de utilização deste tipo de sistema de controle para a agricultura. UMEZU e CAPPELLI (2004) projetaram um sistema controlador de rotação do tipo PID², que se mostrou eficaz e versátil, reduzindo o erro de regime e os erros provenientes das variações provocadas pelo equipamento durante a sua utilização. REIS e FORCELLINI (2006) apresentaram uma série de requisitos para a elaboração de um projeto que são observados como relevantes pelos usuários. Os autores realizaram uma pesquisa utilizando questionários visando definir quais parâmetros são importantes em um semeadora-adubadora. Dentre os fatores observados podem-se destacar a dificuldade na regulagem de aplicação, necessidade do uso de ferramentas para a regulagem e a não possibilidade de se auto-regular.

Nesse sentido, se torna interessante um sistema que minimize estes problemas. A integração de um sistema de aplicação de fertilizantes comercial com sistemas de controle obtém soluções mais precisas, no que diz respeito à qualidade de aplicação, facilidade de utilização e custos reduzidos.

² Controle do tipo Proporcional, Integral e Derivativo (PID)

2 OBJETIVOS

Os objetivos básicos deste trabalho foram: projetar, construir e avaliar um conjunto eletromecânico para dosagem de fertilizantes sólidos. Esse sistema deve ser compacto, de fácil operação e ter robustez na operação.

2.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos desenvolvidos foram:

- Realizar a caracterização de um mecanismo dosador de fertilizante comercial;
- Desenvolver um sistema de aquisição, em tempo real, da taxa de aplicação de fertilizante;
- Projetar um sistema de acionamento elétrico, utilizando-se um motor de corrente contínua;
- Desenvolver um sistema micro-controlado de acionamento e controle da taxa de aplicação de fertilizante;
- Construir um protótipo e avaliar o seu desempenho.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo visa descrever a importância, no sistema de produção agrícola, do mecanismo dosador de fertilizante, principalmente os que utilizam distribuição de adubo diretamente no sulco.

Posteriormente, serão apresentados tipos de equipamentos de aplicação de fertilizantes disponíveis comercialmente e, por último, novas tecnologias pesquisadas para o controle de aplicação de fertilizantes.

3.1 Sistemas de aplicação de fertilizantes sólidos

No Brasil, segundo UMEZU (2003), para a aplicação de fertilizante nas culturas de grãos, utiliza-se um mecanismo denominado semeadora-adubadora que são equipamentos que têm a função de colocar em uma mesma operação o fertilizante e a semente no solo. Para isso este equipamento conta com dois processos distintos: o primeiro é a operação referente a colocação do fertilizante que consiste na abertura de um sulco no solo, na deposição do fertilizante e sua cobertura com uma camada de solo e, posteriormente, como definido por KEPNER *et al.* (1982), da operação de semeadura que consiste em abrir o sulco de semeadura, dosar as sementes, depositá-las no sulco, cobri-las e compactar o solo.

Como este trabalho visa o aprimoramento do sistema de dosagem de fertilizante o enfoque deste capítulo será voltado para esta parte do mecanismo.

As máquinas dosadoras de adubo sólido podem ser enquadradas em dois grandes grupos, de acordo com a forma que realizam a aplicação:

- Adubadoras ou distribuidoras a lanço;
- Adubadoras de fileiras.

BALASTREIRE (1987) classifica os distribuidores de fertilizantes segundo os itens apresentados abaixo:

3.1.1 Sistema helicoidal

O dosador helicoidal, conforme ilustra a Figura 1, é composto por um eixo com um helicóide colocado sob o depósito de fertilizante. A quantidade de produto depositada no solo varia conforme é alterada a velocidade angular do eixo de acionamento do dosador. Ainda pode ser realizada uma pré-regulagem do sistema de transmissão que é, normalmente, realizado por meio de engrenagens ou sistemas de corrente. Este tipo de dosador de fertilizante é o mais utilizado pelos fabricantes de semeadoras-adubadoras.

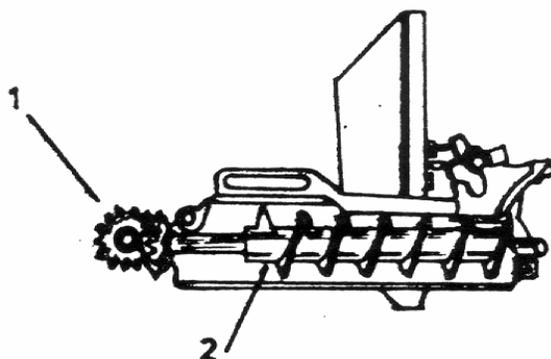


Figura 1: Dosador helicoidal para adubo. 1 – sistema de transmissão, 2 – helicóide do dosador (BALASTREIRE, 1987)

3.1.2 Sistema de rotores dentados

O mecanismo composto por rotores dentados é montado no fundo do depósito de fertilizante. Este equipamento consiste basicamente de um rotor dentado horizontal, Figura 2, que gira sobre uma placa de apoio que contém o orifício de saída do adubo. O rotor recebe o movimento de rotação a partir de um eixo que é movimentado pela rotação da roda de sustentação da máquina. A quantidade de adubo que é depositada pelo rotor para o orifício de saída é regulada através de uma lingüeta ajustável, que controla a espessura da camada de adubo que é empurrada pelos dentes do rotor.

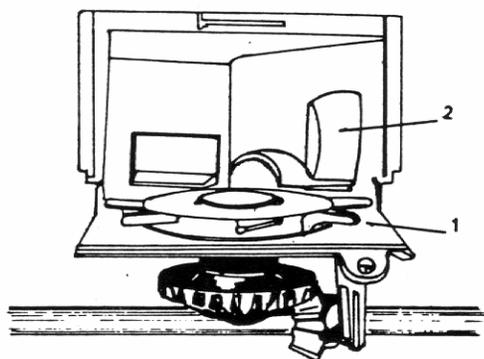


Figura 2: Dosador de rotor dentado para adubo. 1 - rotor dentado, 2 - lingüeta ajustável
(BALASTREIRE, 1987)

3.1.3 Sistema de discos horizontais rotativos

Os dosadores de discos horizontais rotativos são utilizados normalmente em semeadoras para grãos graúdos onde existem dosadores e depósitos de adubos individuais, para cada linha de semeadura. Neste caso, o dosador consta basicamente de um disco liso rotativo, acoplado a uma engrenagem coroa que gira contra uma lingüeta raspadora. A lingüeta raspadora direciona o adubo para o adubo de saída, à medida que o disco rotativo empurra o adubo contra a mesma. A taxa de aplicação de fertilizante é proporcional à abertura da janela de saída e à rotação do depósito de adubo. A Figura 3 ilustra a posição relativa dos componentes desse tipo de dosador.

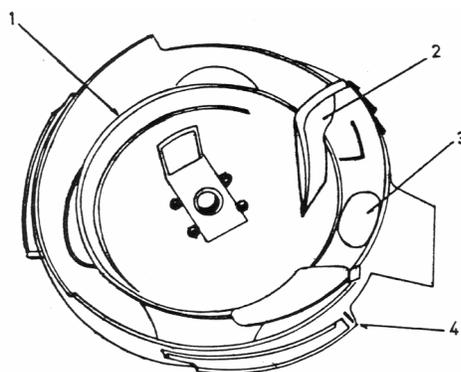


Figura 3: Dosador de adubo de disco horizontal rotativo. 1 - disco, 2 - lingüeta raspadora, 3 - orifício de saída, 4 - base (BALASTREIRE, 1987)

3.1.4 Sistema de rotor vertical impulsador

O rotor vertical impulsador é constituído por seções impulsoras de chapa, ferro fundido ou náilon que, fixadas a um eixo de acionamento, adquirem uma dupla função: agitar e impulsar o fertilizante para fora da janela de saída. A dosagem do adubo é ajustada regulando-se a posição da chapa deslizante que funciona como janela de saída regulável. A Figura 4 ilustra a construção desse tipo de dosador. Os fabricantes que utilizam este tipo de dosador afirmam que uma das suas principais vantagens é a uniformidade de aplicação de adubo.

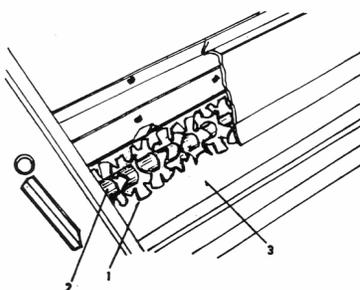


Figura 4: Dosador de adubo de rotor vertical impulsor. 1 - rotor, 2 - eixo, 3 - depósito (BALASTREIRE, 1987)

3.1.5 Sistema de correias ou correntes

Os dosadores de correias ou correntes são constituídos de uma correia ou corrente que trabalham sob o fundo do depósito de adubo, dosando a quantidade de material a ser aplicada pelo transporte através de uma abertura regulável. A Figura 5 ilustra esse tipo de dosador.

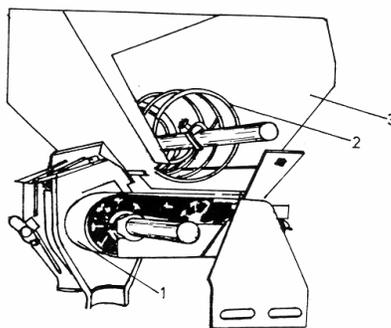


Figura 5: Dosador de adubo de correia. 1 - correia, 2 - agitador, 3 - depósito (BALASTREIRE, 1987)

3.2 Importância da aplicação uniforme de fertilizantes

A fertilidade do solo é parte de um sistema dinâmico. Os nutrientes são constantemente “exportados” na forma de produtos vegetais, animais e outros se perdem por lixiviação e erosão (LOPES, 1998). Se o processo produtivo da agricultura fosse um sistema fechado, o balanço nutricional poderia ser relativamente estável. Sendo um sistema aberto existem perdas de nutrientes os quais devem ser repostos mediante correção do solo e fertilização. Este é o motivo essencial que torna necessário a compreensão dos princípios de fertilidade do solo para uma produção eficiente das culturas e para a proteção ambiental.

Os macro-nutrientes, segundo RAIJ (1991), são subdivididos em nutrientes primários Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K) que têm maior importância prática para a cultura, pois são comercializados em grande escala e possuem um custo mais elevado que os nutrientes secundários como Cálcio (Ca), Magnésio (Mg) e Enxofre (S). Os micro-nutrientes Boro (B), Cloro (Cl), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), são geralmente menos escassos e usados em quantidades menores.

A adequada fertilidade do solo e eficiente produção vegetal dependem da oferta equilibrada de todos os nutrientes. De acordo com “A lei do mínimo” de LIEBIG (citado por IAP, 1999), a limitação de desenvolvimento de uma cultura ocorre devido à deficiência de qualquer nutriente que a planta necessite para seu crescimento, não importando se os outros nutrientes suprem a demanda da planta. Com isso, pode-se observar que a produção da cultura é limitada pelo nutriente menos disponível para as plantas.

Segundo RAIJ (1991), a taxa de aplicação de fertilizante recomendada pode ser obtida pela produtividade no ano anterior da cultura. Isso se deve ao fato da quantidade de nutriente que a planta retira do solo ser definida em função da produtividade. O autor define outro parâmetro importante para se determinar a taxa de fertilizante a ser aplicada, definido como índice de exportação que é a capacidade de absorção pela cultura do total de nutriente depositado no solo, isto é, a eficiência de absorção da planta em função do total aplicado. Com isso a quantidade de fertilizante a ser aplicada é definida pela relação entre a produtividade da cultura e o índice de exportação.

A Tabela 1 ilustra alguns exemplos da quantidade de nutrientes necessárias para a reposição do solo em função da produção da cultura. Foram selecionados estes casos, que serão usados no item 4.4.1.6 para o dimensionamento do motorredutor, pois estas culturas são diretamente ligadas ao tipo dosador de fertilizante que será utilizado.

Tabela 1: Conteúdo de nutrientes em culturas por tonelada de produto colhido e índices de exportação destes nutrientes nas colheitas

Cultura	Material Considerado	N	P ₂ O ₅ Kg	K ₂ O	Índice de Exportação		
					N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Feijão	Grãos	102	21	113	0,4	0,4	0,2
Amendoim	Vagens	87	17	58	0,6	0,6	0,5
Milho	Grãos	29	13	33	0,6	0,8	0,2
Arroz	Grãos	16	8	21	0,7	0,8	0,2

Fonte: RAIJ (1991)

Ao se observar a importância do nutriente no solo para o desenvolvimento da cultura pode-se verificar que os fertilizantes agrícolas são aplicados no solo para aumentar a quantidade disponível de nutrientes para as plantas (principalmente nitrogênio, fósforo e potássio) e assim aumentar a produtividade da cultura. A uniformidade de distribuição e sua deposição adequada se tornam cada vez mais importantes, no sentido de se obter uma máxima resposta do cultivo a um custo mínimo, já que o custo do fertilizante representa, no Brasil, uma grande parcela do custo total da produção.

Segundo VILLAR *et al.* (2004), o custo de fertilizante pode chegar a mais de 41% do custo total de produção de milho e 10% de arroz, diferentemente de países desenvolvidos como Estados Unidos e França, como mostra a Tabela 2.

Tabela 2: Preço e custos da aplicação de fertilizantes no Brasil, Estados Unidos e França

Item	Brasil			Estados Unidos			França		
	Soja	Milho	Arroz	Soja	Milho	Arroz	Soja	Milho	Arroz
Quantidade (kg/ha)	510	600	320	48	95	195	320	320	280
Preço (US\$/kg)	0,19	0,19	0,17	0,91	1,23	0,41	0,16	0,47	0,59
Custos (US\$/ha)	98	116	55	59	121	79	50	150	164
Fertilizantes/produção (%)	15,5	10	6	1,6	0,9	4,4	10,3	3,6	4,7
Fertilizantes/custo total (%)	33	41	10	8	13	8	8	18	14

Fonte: VILLAR *et al.* (2004).

Além do alto custo da operação de aplicação de fertilizante, outro fator que influencia na produtividade da cultura é a qualidade da aplicação. Em estudo realizado por SOGAARD e KIERKEGAARD (1994), observou-se que a produtividade cai conforme se diminui o nitrogênio depositado no solo Figura 6 (a). Na Figura 6 (b) pode-se observar que, conforme o coeficiente de variação da taxa de aplicação aumenta, há uma diminuição do nitrogênio “realmente disponível” para a planta, implicando perda na produtividade.

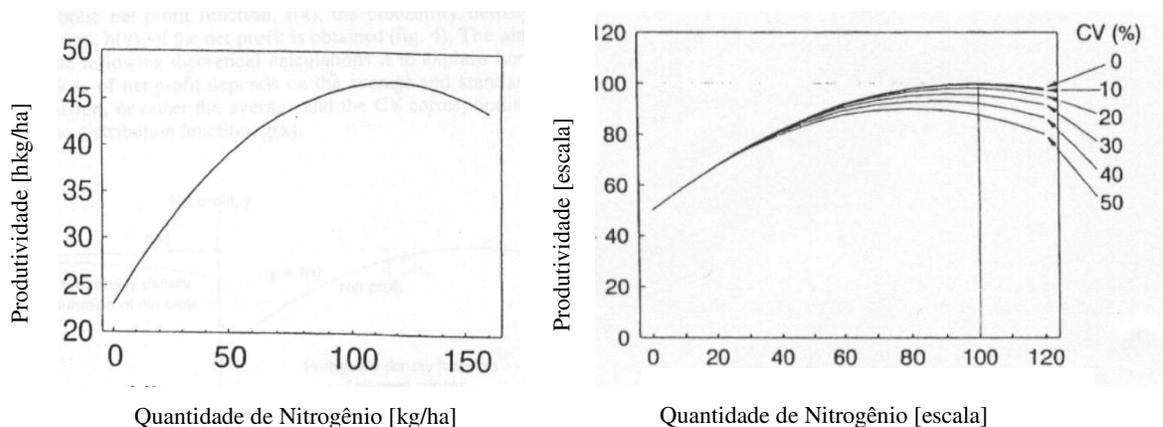


Figura 6: (a) Produtividade da cultura de trigo em função da disponibilidade de Nitrogênio (b) Variação da produtividade em função do coeficiente de variação da taxa de aplicação. (SOGAARD e KIERKEGAARD, 1994)

3.2.1 Fatores que influenciam a qualidade de aplicação de fertilizante

O desempenho do sistema dosador de fertilizante depende de uma série de características do equipamento e do tipo de operação que o mecanismo será alocado. Estes fatores são fundamentais, pois ao conhecer os parâmetros que afetam na taxa de aplicação pode-se adotar procedimentos para minimizar tais efeitos, com isso se obter um equipamento mais adequado à operação proposta.

3.2.1.1 Tipo de fertilizante

SCHNEIDER *et al.* (2005) verificaram que a aplicação de fertilizante ocorre de maneira imprecisa. Em seu estudo os autores utilizaram diversos tipos de fertilizantes, com diferentes propriedades físicas. Neste estudo se observou que a taxa de aplicação depende do tipo de fertilizante utilizado. Ainda, pôde-se notar que a taxa de aplicação nominal do fabricante, que é a taxa de aplicação fornecida pelo fabricante em função da regulagem pré-realizada e da velocidade de deslocamento do equipamento, apresenta um valor discrepante da quantidade de fertilizante aplicada na realidade. Os gráficos da Figura 7 ilustram o resultado obtido experimentalmente (colunas) e a dosagem nominal do fabricante (linhas). No experimento foram utilizadas cinco formulações de fertilizantes: 02-20-18 Topmix Trevo, 08-20-20 Fertipar, 08-20-20 Topmix Trevo, 02-20-18 Somax Trevo/NPK e 02-20-20 Mistura de grânulos Trevo. Foram realizados testes com três velocidades (5, 7 e 9 km h⁻¹) e três dosagens (mínima, média e máxima, de acordo com o manual do usuário).

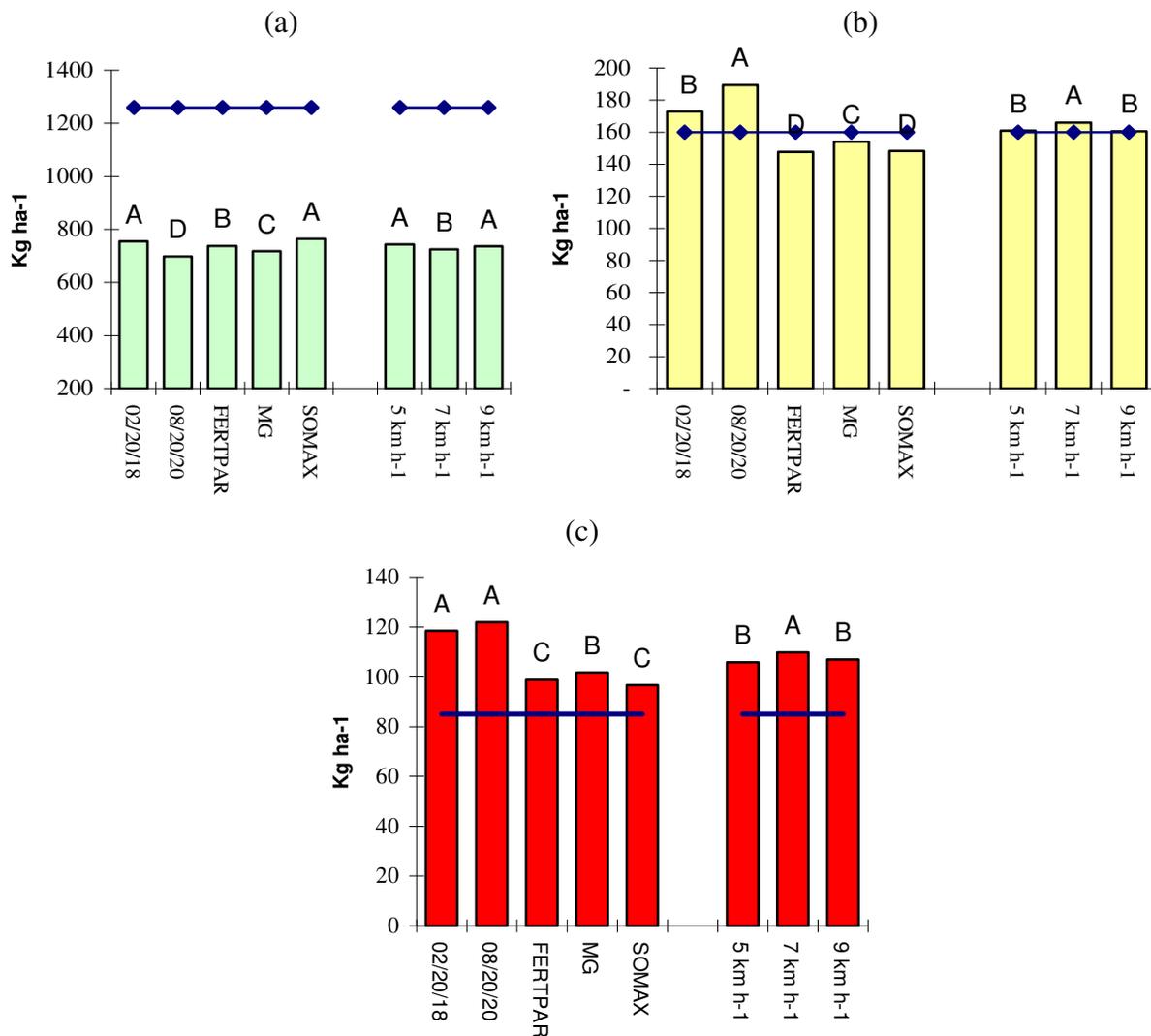


Figura 7: Comparativo entre a distribuição de fertilizante nominal do fabricante e a encontrada experimentalmente para diferentes tipos de dosagem (a) mínima; (b) média; (c) máxima (SCHNEIDER *et al.*, 2005).

Com isso, se concluiu que existem variações nas vazões obtidas nos ensaios se comparados com os valores nominais do manual do equipamento. A taxa de aplicação é influenciada pela diferença das propriedades físicas do fertilizante utilizado, sendo assim há a necessidade de se regular o sistema dosador de fertilizante conforme a formulação usada. Ainda se verificou que a velocidade influencia a dosagem de adubo, mostrando que o sistema de controle da taxa de aplicação mecânica é pouco precisa.

3.2.1.2 Velocidade de deslocamento do equipamento

MANTOVANI *et al.* (1992), ao avaliar diferentes modelos de semeadoras, verificaram que o coeficiente de variação para a distribuição de fertilizante varia entre 6 e 57 %. CASÃO JUNIOR *et al.*, citado por MAHL (2002), observaram uma variação de até 12 % de dosagem de adubo para uma semeadora regulada para taxa de aplicação de 200 kg.ha⁻¹. YAMAMOTO *et al.* (2006) desenvolveram e avaliaram um sistema dosador de fertilizante. A avaliação foi realizada variando-se a velocidade de deslocamento do equipamento e a abertura o mecanismo dosador. Como resultados, verificaram que o comportamento de distribuição do dosador é proporcional à velocidade de deslocamento do equipamento. Para cada acréscimo de 1 km.h⁻¹ houve uma redução na taxa de aplicação de 11 kg.ha⁻¹.

Contudo, em estudos realizados por MAHL (2002), que avaliou a semeadora-adubadora de fluxo contínuo marca Semeato modelo TD300, MAHL *et al.* (2006), que realizou testes em uma semeadora-adubadora de precisão da marca *Marchesan* modelo PST2 de arrasto com mecanismo distribuidor de fertilizante do tipo condutor helicoidal, e FERREIRA *et al.* (2006) que efetuaram testes com uma adubadora marca DCS modelo 53 com seis linhas de dosadores para fertilizantes, dois por depósito, tipo rosca sem fim por transbordo, não foi observada a influência da velocidade na taxa de aplicação de fertilizantes.

Com isso, pode-se observar que há diferentes resultados quanto a influência da velocidade de deslocamento do equipamento na taxa de aplicação. Este tipo de erro pode ocorrer devido ao sistema de transmissão do mecanismo ou devido à patinação da roda de acionamento. Este é um dos principais problemas para a correta aplicação de fertilizante, pois a correta definição da velocidade de deslocamento do equipamento é, de modo geral, imprecisa, tanto em sistemas mecânicos como eletrônicos de medida.

3.2.1.3 Nível do reservatório

Outro fator que pode influenciar a não uniformidade da taxa de aplicação é a altura do nível de fertilizante no reservatório. FERREIRA *et al.* (2006) realizaram um estudo com um distribuidor tipo helicoidal, no qual foi avaliada a influência do nível de fertilizante no depósito sobre a quantidade depositada pelo dosador. Para isso os autores realizaram ensaios

com três níveis de fertilizantes no reservatório do equipamento ($\frac{1}{1}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{4}$). Além disso, utilizaram-se sete relações de transmissão. Os resultados, conforme ilustra o gráfico da Figura 8, indicam que no mecanismo dosador helicoidal a quantidade de produto no reservatório influencia a quantidade de fertilizante distribuído. Quanto maior o nível de produto no depósito, maior as quantidades depositadas.

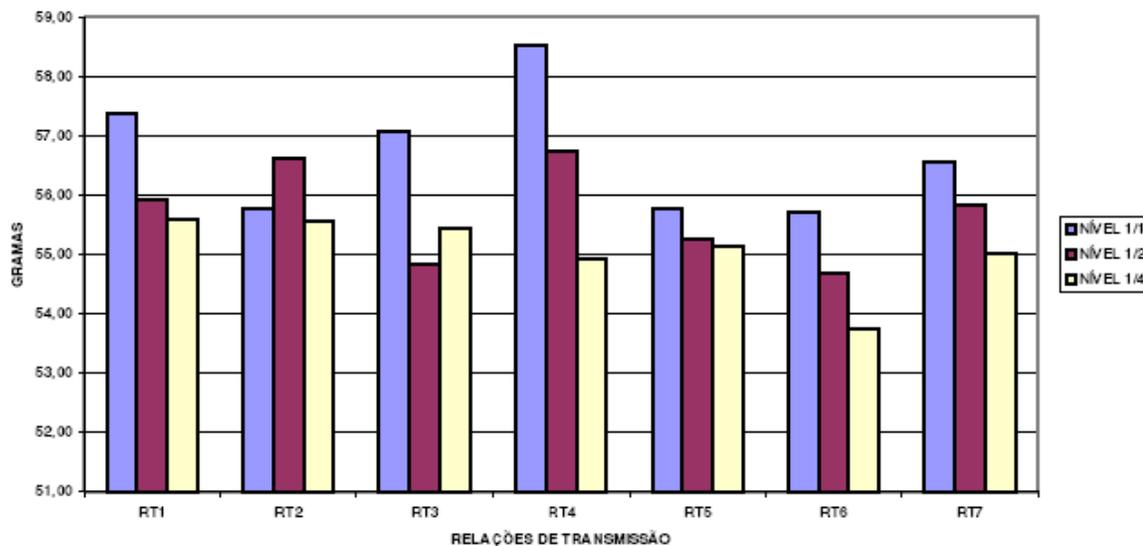


Figura 8: Médias do produto distribuído por rotação do eixo de acionamento (RT1 a RT7) do dosador em função do nível de fertilizante no reservatório. (FERREIRA *et al.*, 2006)

MAHL *et al.* (2006) realizaram teste com uma semeadora-adubadora de milho para verificar a influência da velocidade e da altura do nível de fertilizante no reservatório na taxa de aplicação. Neste estudo foram efetuados testes com três diferentes velocidades de operação de semeadura de milho (3,3, 7,1 e 9,8 km.h⁻¹) e três alturas do nível de fertilizante no reservatório ($\frac{1}{1}$, $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{6}$). Neste trabalho pode-se observar que a velocidade de deslocamento não interferiu na aplicação de fertilizantes. No entanto, a distribuição de fertilizantes é proporcional ao nível de produto nos reservatórios. Com o reservatório cheio ocorreu uma dosagem 5,8% maior na taxa de aplicação de fertilizante em relação ao reservatório abastecido com 50% de sua capacidade. Contudo, a dosagem de fertilizante não diferiu das demais quando o depósito se encontrava com $\frac{1}{6}$ de sua capacidade (Tabela 3).

Tabela 3: Taxa de aplicação de fertilizante, em kg.ha⁻¹, em função do nível de fertilizante no reservatório e velocidade de deslocamento do equipamento.

Velocidade (km h ⁻¹)	Nível de produtos nos reservatórios			Média
	Cheio (1/1)	Médio (1/2)	Mínimo (1/6)	
3,3	266,61	248,03	265,84	260,16
7,1	262,16	252,63	254,06	256,28
9,8	269,41	254,10	252,83	258,78
Média	266,06 a	251,59 b	257,57 ab	258,41

*Médias seguidas de letras minúsculas diferentes em cada linha diferem entre si pelo Teste de Tukey a 5% de probabilidade. A ausência de letras indica que as médias não diferem entre si pelo referido Teste. Coeficiente de variação: 6,80%.

Fonte: MAHL *et al.* (2006)

3.2.1.4 Mecanismo de acionamento

A variação na distribuição de fertilizantes entre cada linha de semeadura é outro problema observado. Isto indica que a semeadora-adubadora pode apresentar falhas em alguns componentes que provocaram erros nas dosagens. MAHL (2002) observou uma diferença significativa na taxa de aplicação em uma linha de plantio da semeadora-adubadora avaliada em seu trabalho. Em outro trabalho MAHL *et al.* (2006) verificaram que em três linhas da semeadura houve um desvio na dosagem em torno de 8% acima da média e em outras três um desvio na mesma magnitude abaixo da média. Isto se deve, provavelmente, a uma falha no sistema de acionamento/transmissão, pois cada eixo da máquina é responsável pelo

acionamento dos mecanismos de dosagem e distribuição de três unidades de semeadura. Em média obteve-se um aumento de 18% na dosagem de fertilizante das três linhas da esquerda em relação às da direita. Devido a essas falhas o coeficiente de variação entre as linhas de semeadura foi de 9,38% para a aplicação de fertilizante.

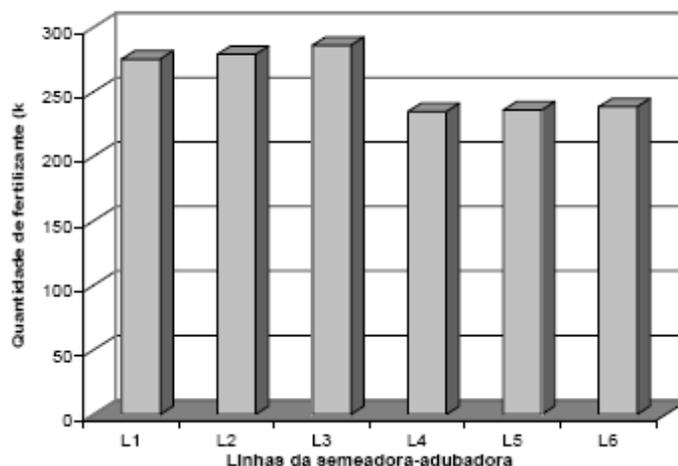


Figura 9: Taxa de aplicação de fertilizante por linha de semeadura (MAHL *et al.*, 2006).

3.3 Utilização de controladores e equipamentos eletrônicos na agricultura

Largamente difundidos em processos industriais, os sistemas de controle permitem a regulagem do funcionamento de um equipamento a partir da medição de parâmetros, realizada por meio de sensores, que fornecem ao controle uma alimentação contínua de dados no decorrer do processo. Desta maneira KUO (1995) observa que os sistemas de controle são encontrados em diversos setores da indústria, como: controle de qualidade e fabricação de produtos, linha de montagem automática, controle de ferramentas, tecnologia espacial, sistemas de transporte, sistemas de potência, robôs e muitos outros.

Com o aumento da preocupação em otimizar a utilização dos insumos presentes na produção agrícola, devido à grande pressão por maior produtividade (SCARLETT, 2001) e à atenção dispensada pelo público à degradação ambiental (KING *et al.*, 1999) tornou-se necessária a introdução de novas tecnologias na agricultura.

Novas tecnologias aplicadas à agricultura permitem maior precisão, flexibilidade, confiabilidade e eficácia às diferentes etapas da produção, garantindo o aperfeiçoamento das máquinas e equipamentos utilizados, que tendem a produzir cada vez mais com o mínimo de recursos desperdiçados (SCARLETT, 2001). Existem diversos exemplos de aplicações na agricultura de sistemas de controle que atingiram êxito na otimização dos processos controlados.

PALACÍN *et al.* (2005) utilizaram um sistema de controle modular embarcado, baseado em microcontroladores. A Figura 10 apresenta o esquema do controlador. Este sistema possui um sensor de velocidade que alimenta o microcontrolador que é responsável pelo controle do tempo de abertura de cada aspersor. Como resultado, conseguiu-se uma melhora muito significativa da constância no fluxo de água na área irrigada.

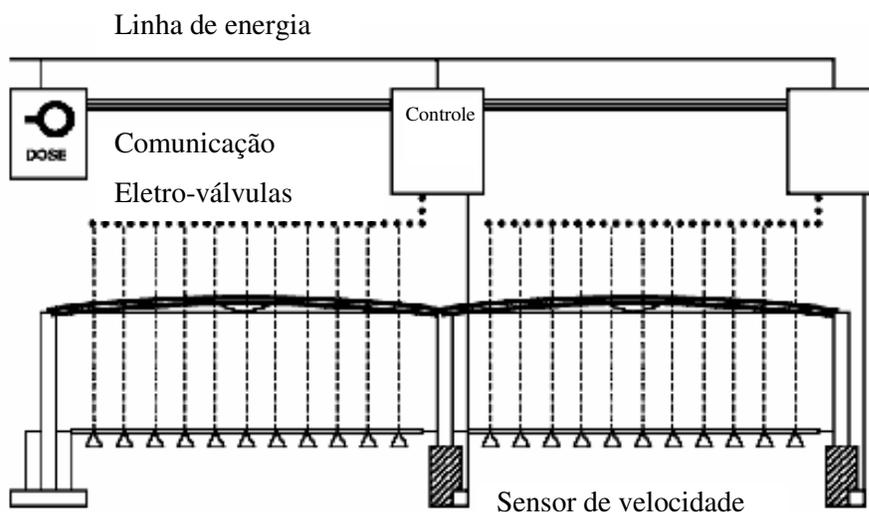


Figura 10: Esquema do sistema de controle de um pivô central para irrigação (PALACÍN *et al.*, 2005)

GARCIA *et al.* (2005a), para a avaliação de uma colhedora de feijão, utilizaram um sistema de aquisição de dados automático, o que permitiu a verificação, em tempo real, do sistema de recolhimento do equipamento. Para isso, foram utilizados: um radar para medição da velocidade de deslocamento do equipamento, um sensor indutivo para medir a rotação do

motor e um torquímetro para medir o torque requerido pelo equipamento. A aquisição e armazenamento dos dados foi realizada em *LabView*³ para posterior tratamento.

Outro trabalho, de SOLDATOS *et al.* (2005), também fez uso de sistemas de controle. Seu objetivo foi implementar um controle robusto não-linear de umidade do ar e temperatura para granjas. O método de controle proposto faz uso de retro-alimentação e alimentação em avanço combinadas e consegue lidar com perturbações externas desconhecidas com facilidade, necessitando-se de poucos dados de entrada em tempo real, o que representa um avanço em relação aos sistemas de controle de condições ambientais para granjas existentes anteriormente.

RAFULL *et al.* (2004) implantaram em uma colhedora de cana-de-açúcar um sistema de controle realimentado constituído de uma célula de carga, destinada a medir a força de contato entre o solo e o mecanismo de corte, um controlador PID e um sistema hidráulico de atuação, compostos por uma válvula proporcional direcional e um atuador. Com isso, pode-se analisar a influência da velocidade de deslocamento da máquina, a pressão de suprimento do sistema hidráulico e da força de contato de referência do controlador no desempenho do sistema de controle.

Estes trabalhos indicam que há uma crescente demanda pela substituição de mecanismos, que tradicionalmente eram mecânicos, por soluções que utilizam sistemas eletromecânicos. Isso se deve, como observado por KUO (1995), à massificação destes tipos de equipamentos em todos os ramos industriais, o que barateia custos de produção e desenvolvimento de novos produtos.

3.3.1 Utilização de sistemas de controle eletromecânicos em dosadores de fertilizantes sólidos

A utilização de sistemas eletrônicos de controle de taxa de aplicação de fertilizantes vem sendo desenvolvida principalmente para atividades que utilizam sistemas voltados para a agricultura de precisão. SCARLETT (2001) descreveu os potenciais de uso de sistemas de controle para a agricultura. Dentre os potenciais de uso, o autor referiu a utilização de sistemas integrados de controle juntamente com o sistema hidráulico, podendo ser utilizado, por

³ *LabView* programa computacional de supervisão e controle da marca *National Instruments*

exemplo, na profundidade do mecanismo de preparo e plantio no solo, como ilustra a Figura 11.

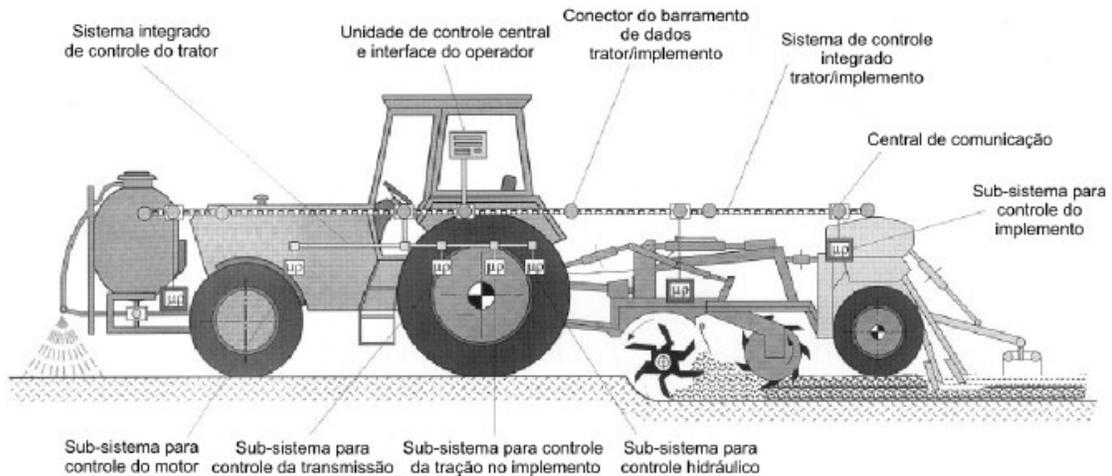


Figura 11: Sistema integrado de controle dos implementos (SCARLETT, 2001).

O controle de profundidade pode ser efetuado com o uso de um controlador de pressão que indica a resistência que o mecanismo está sofrendo em relação ao solo. A profundidade é medida por meio de um sensor de ultra-som. O controle pode ser feito de duas formas, como ilustra a Figura 12. No sistema da Figura 12(a) há a necessidade do operador controlar a profundidade do equipamento, já que o sistema fornece a informação de profundidade, mas não atua na correção de possíveis erros. Já na Figura 12(b) existe um sistema de controle que efetua eventuais correções de profundidade, não necessitando da atuação do operador. (SCARLETT, 2001).

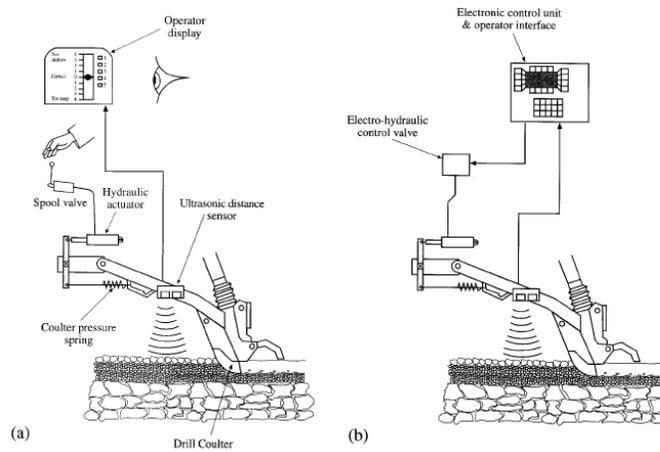


Figura 12: Métodos para o controle de profundidade de deposição de sementes. (a) controle manual de profundidade (b) controle automático de profundidade (SCARLETT, 2001).

No trabalho realizado por CAPPELLI *et al.* (2000) avaliou-se o desempenho de um dosador do tipo helicoidal de fertilizantes sólidos, visando sua utilização em um equipamento de aplicação de fertilizantes a taxas variáveis. Para tanto, se projetou e construiu uma bancada para testes destes dispositivos (Figura 13). A bancada construída consistiu de um motor elétrico para acionamento dos dosadores com controle de velocidade através de um inversor de frequência e de um sistema de aquisição de dados.

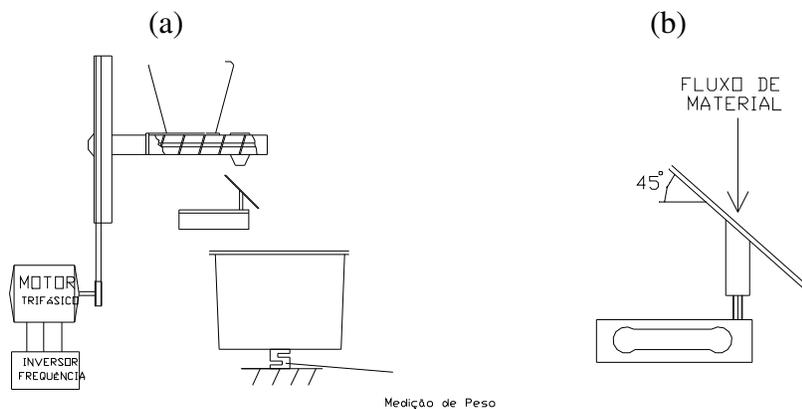


Figura 13: Desenhos esquemáticos: (a) Vista do sistema de acionamento e de medição de fluxo; (b) Detalhe do sensor de fluxo mássico (CAPPELLI *et al.* 2000).

Utilizando esta bancada pode-se observar o comportamento da vazão mássica em função do tempo, Figura 14. Notou-se claramente um comportamento oscilatório da aplicação. Observou-se, também, que o dosador apresentou melhor uniformidade de aplicação quando operando a vazões mais elevadas.

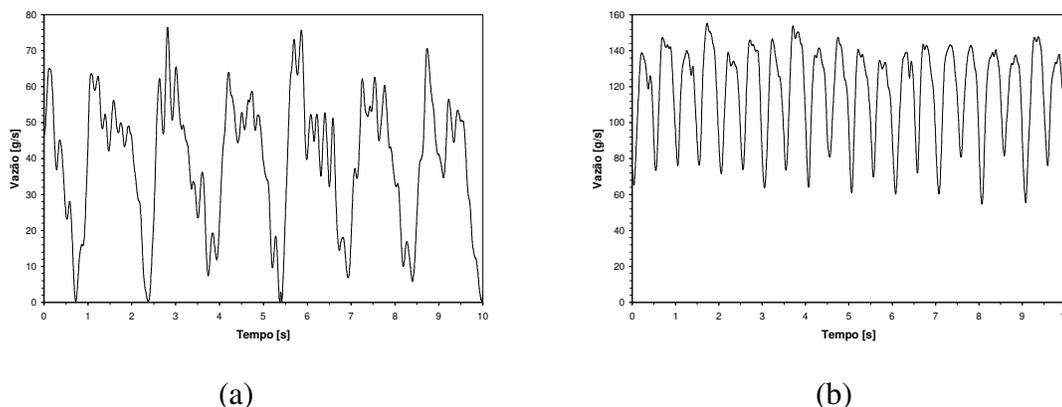


Figura 14: Vazão mássica em função do tempo. (a) Rotação de 40 min^{-1} no eixo do dosador e (b) Rotação de 120 min^{-1} no eixo do dosador (CAPPELLI *et al.* 2000).

OLIVA *et al.*(2001) realizaram adaptações em uma máquina convencional de aplicação de fertilizantes comercial, marca Jumil, modelo EXACTA AIR 2980 EX 08, para torná-la um equipamento de aplicação localizada. Para tanto, foi utilizado um sistema de acionamento hidráulico acionado por um motor elétrico com um conversor de frequência que o acionou na rotação desejada para se obter a taxa de aplicação indicada. Como resultado os autores observaram que o sistema hidráulico de acionamento dos eixos dos dosadores mostrou-se adequado para o fim proposto.

UMEZU (2003) utilizou um controlador PID para definir a vazão de aplicação e a formulação de fertilizantes. Esse sistema contou com um receptor GPS com correção diferencial, em tempo real, para fornecer informações geo-referenciadas da posição do equipamento. Os dispositivos dosadores, Figura 15, foram acionados por motores hidráulicos com velocidades angulares controladas através de servoválvulas de vazão, compensadas à pressão. O mecanismo de dosador utilizado no experimento foi do tipo helicoidal flutuante.

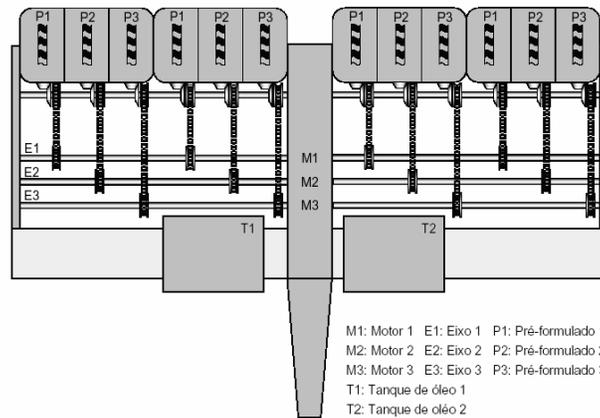


Figura 15: Diagrama esquemático do sistema de acionamento dos dosadores (UMEZU, 2003)

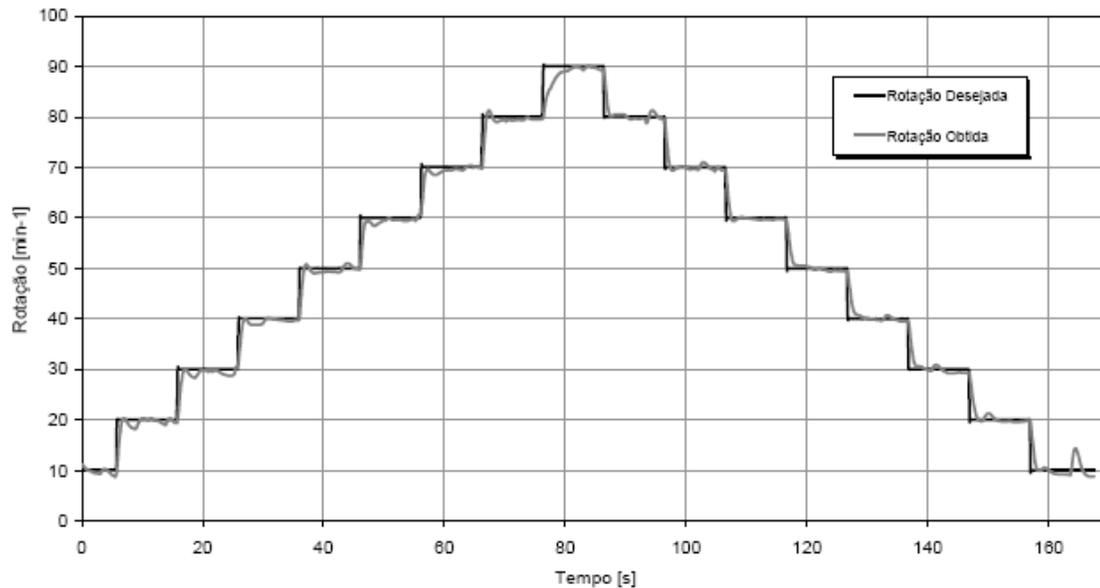


Figura 16: Comportamento dinâmico do sistema para entradas em degraus de rotação (UMEZU, 2003)

MENEGATTI *et al.* (2004) desenvolveram um protótipo de um sistema de dosagem de fertilizantes sólidos composto por: um dosador do tipo rotores acanalados que atende a duas linhas de plantio e regula a vazão somente em função de sua velocidade angular, um microcontrolador; um motorreductor de corrente contínua; um amplificador de potência chaveado; um sistema de transmissão de movimento; e um reservatório. Com este protótipo foram realizados os ensaios que forneceram dados para avaliação do desempenho do sistema.

Primeiramente foi realizado o ensaio do comportamento da vazão em função da velocidade angular do dosador, Figura 17.

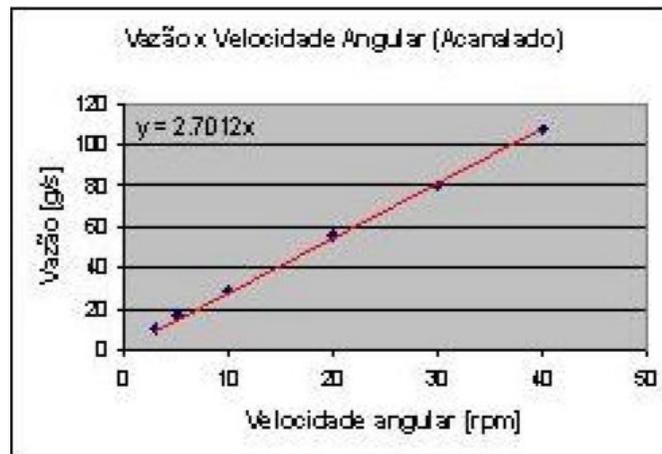


Figura 17: Gráfico da vazão pela velocidade angular do dosador acanelado (MENEGATTI *et al.*, 2004)

Realizou-se também um ensaio do comportamento dinâmico do sistema para entradas em degrau de velocidade para a verificação da resposta do sistema a distúrbios externos, Figura 18.

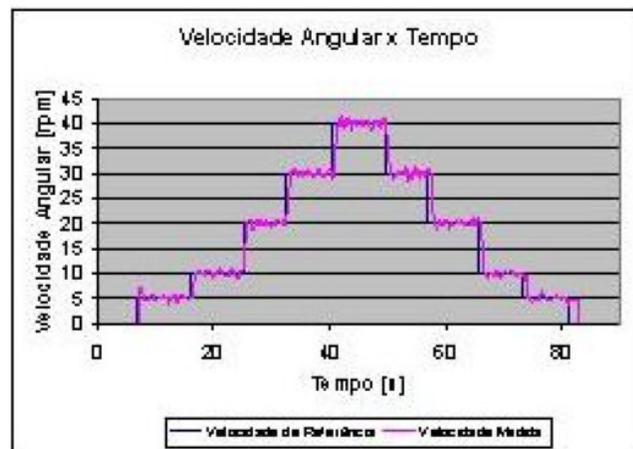


Figura 18: Comportamento dinâmico do sistema para entradas em degraus de velocidade angular do eixo de acionamento (MENEGATTI *et al.*, 2004)

Os resultados apontados pelos autores apresentaram um desempenho do sistema bastante satisfatório, erro máximo de 3% entre a aplicação nominal e a real, muito próximos

aos obtidos por UMEZU (2003). Com isso, nota-se que o sistema de aplicação utilizando um sistema controlador PID tem grande potencial de uso.

RUSSO (2005) desenvolveu de um Módulo de Interface (MDI) para ser utilizado em um sistema de formulação e aplicação localizada de nutrientes líquidos a taxas variáveis. A função deste módulo é receber as informações provenientes do controle do sistema de aplicação, efetuar as leituras dos sensores de campo, processar os dados e comandar os periféricos envolvidos na aplicação, tais como: bombas, eletro-válvulas e válvulas proporcionais para controle de fluxo. Para isso, o autor desenvolveu um *hardware* e *software* visando a otimização das funções executadas pelo MDI com a finalidade de possibilitar a operação do sistema utilizando um microcontrolador.

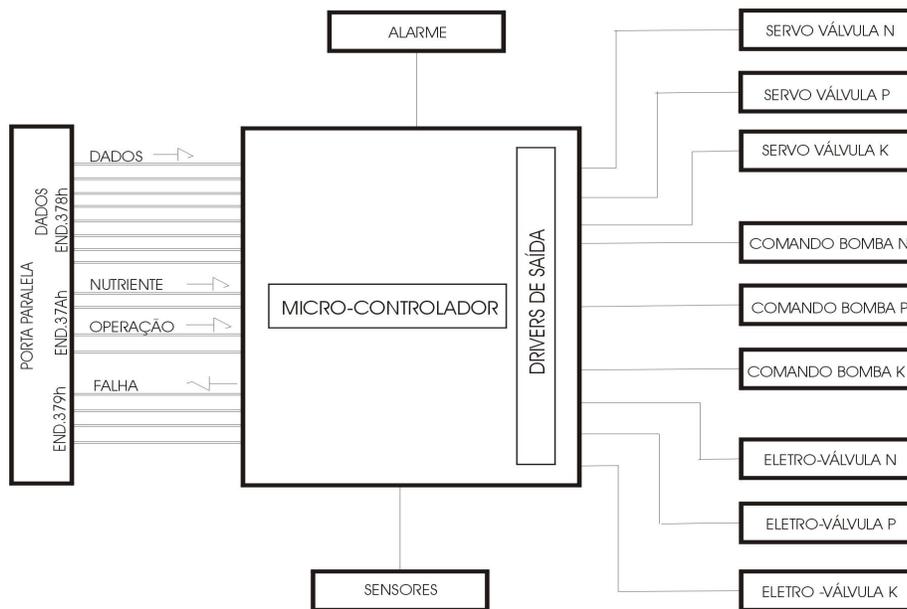


Figura 19: Diagrama de blocos do Módulo de Interface (RUSSO, 2005)

Como resultado, o comportamento dos circuitos geradores de sinais de acionamento das servo-válvulas foi estável e possibilitou um controle preciso do ângulo de abertura.

Neste item pode-se observar que há um grande interesse em pesquisas direcionadas a mecanismos eletromecânicos de controle de aplicação de fertilizante. Contudo, na grande maioria dos trabalhos os mecanismos são projetados para sistemas que utilizam ferramentas de agricultura de precisão, isto é, aplicação de fertilizante à taxas variadas, sistema de informação

geo-referenciadas (SIG) e a presença de sensores. De outra maneira este projeto visa o desenvolvimento de um equipamento para a utilização em sistemas convencionais de cultivo, visando redução de custos e fácil implementação pela maioria dos produtores.

4 MATERIAL E MÉTODOS

Neste capítulo, primeiramente, serão definidas as concepções do mecanismo de controle com as partes do sistema proposto. Posteriormente serão definidos, para maior facilidade organizacional, os materiais e a metodologia em cada etapa do projeto.

4.1 Concepção do sistema de controle proposto

O conjunto de aplicação de fertilizante contou com um sistema controlador que teve a capacidade de variar a velocidade de rotação do motor elétrico conforme se modificavam as condições de trabalho. A Figura 20 mostra o diagrama de blocos que representa as variáveis de entrada e a variável de saída do controlador.

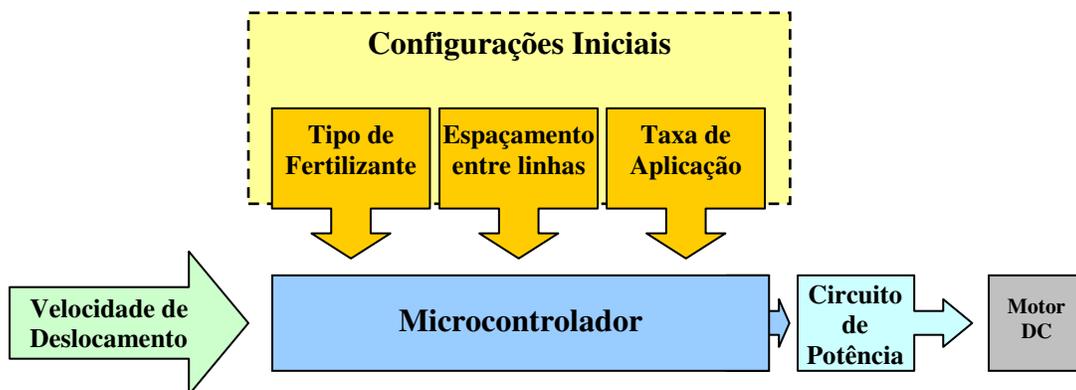


Figura 20: Diagrama de blocos do conjunto de controle da taxa de aplicação proposto

A Figura 20 mostra o esquema proposto para o conjunto dosador. A velocidade de deslocamento foi obtida por meio de um sensor de velocidade de deslocamento do equipamento, sem interferência do operador. As configurações iniciais (tipo de fertilizante, taxa de aplicação e espaçamento entre linhas de plantio) devem ser definidas pelo operador antes da utilização do equipamento.

O microcontrolador, utilizando-se dos dados de velocidade e dos dados configurados pelo operador, atua na velocidade de rotação do motor de acionamento do dosador, com isso aplica o fertilizante no solo de maneira controlada. O sistema de controle foi desenvolvido em malha aberta (Figura 21) devido à sua menor complexidade e ao custo reduzido em comparação com um sistema de controle em malha fechada, que requer a realimentação por meio de sensores.

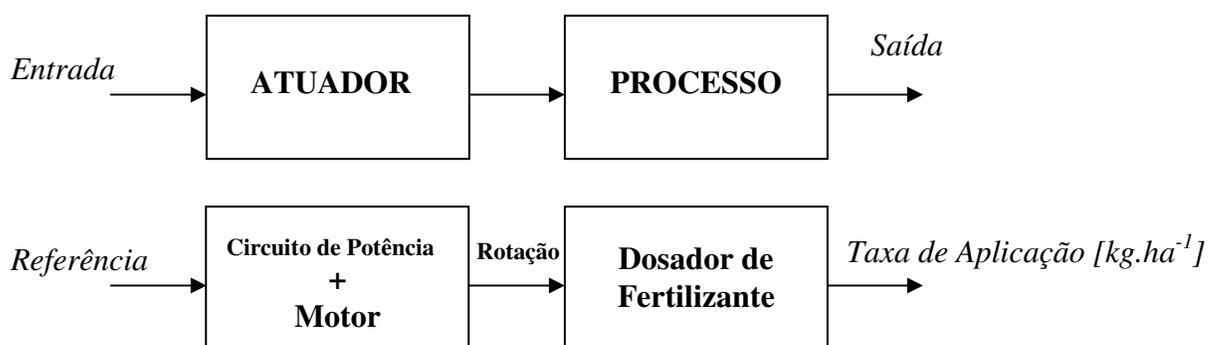


Figura 21: Sistema de controle em malha aberta

O sistema proposto opera com a relação obtida por meio do modelo matemático do mecanismo dosador de fertilizante que relaciona as variáveis de referência, ou seja as variáveis de entrada (densidade de fertilizante, espaçamento entre linhas e velocidade de deslocamento do equipamento) com a variável de saída, que é a taxa de aplicação. O controle da taxa de aplicação é realizado pela variação da tensão de alimentação do motor, por meio de um sinal PWM⁴, que regula a rotação do eixo de acionamento do dosador. Esta rotação define a taxa de aplicação de fertilizante.

4.1.1 Fluxograma de operação do sistema de controle

O diagrama de blocos da operação do sistema apresentado na Figura 22 ilustra a rotina de operações seguidas pelo sistema de controle. O programa computacional segue a seqüência lógica apresentada.

⁴ PWM – Modulação por largura de pulso, do inglês *Pulse Width Modulation*

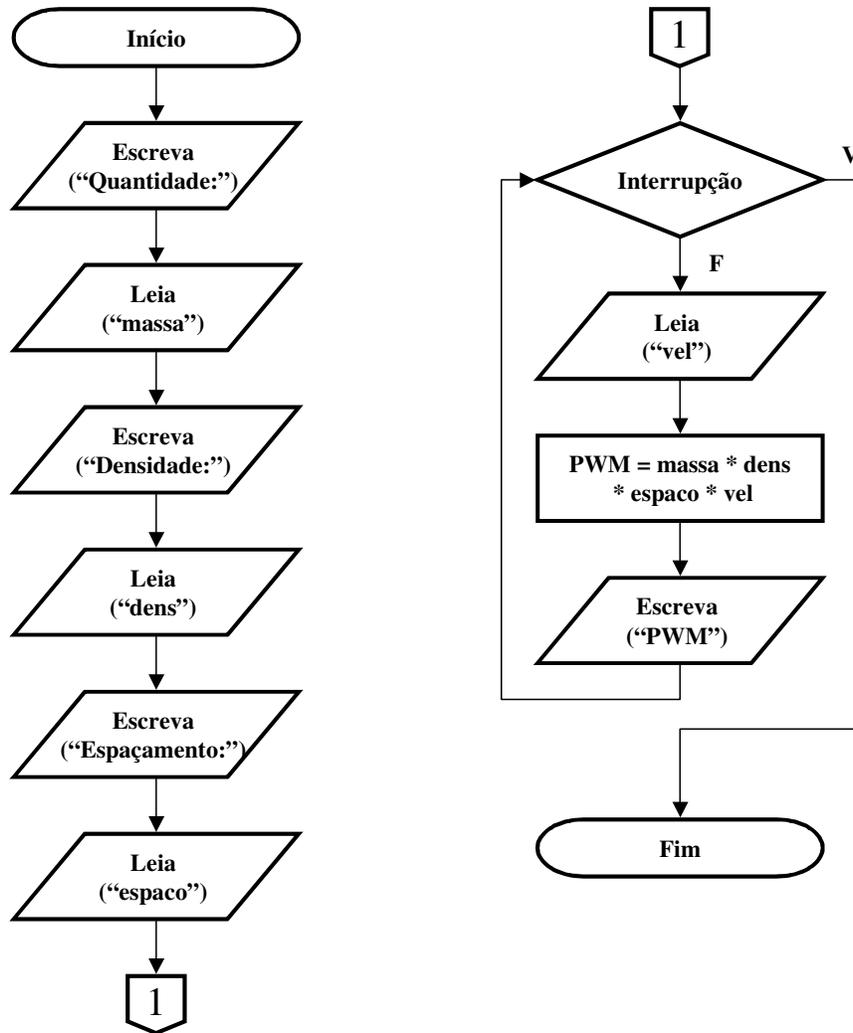


Figura 22: Fluxograma da operação do sistema de controle proposto

4.1.2 Configuração inicial do sistema

O item configuração do sistema é realizado toda vez que o equipamento for inicializado. Através dos parâmetros definidos pelo operador o sistema é capaz de, automaticamente, regular a taxa de aplicação para que a mesma permaneça uniforme durante a operação.

4.1.2.1 Taxa de aplicação

O estabelecimento da formulação do fertilizante e da quantidade a ser aplicada deve ser definido pelo técnico extensionista, baseando-se na cultura a ser implantada e na análise de solo.

Cabe ao operador do equipamento informar ao sistema a taxa de aplicação recomendada pelo técnico. Esta informação é fornecida via digitação do valor.

4.1.2.2 Formulação do fertilizante

Ao energizar o sistema, o usuário tem a opção, no *display*, de entrar, pelo teclado, com o tipo de cultura cultivada. Após a seleção da cultura são listadas, no *display*, diversas formulações de fertilizantes comumente utilizados nesta cultura, na qual o usuário deve selecionar o fertilizante a ser aplicado, conforme ilustra o fluxograma da Figura 23.

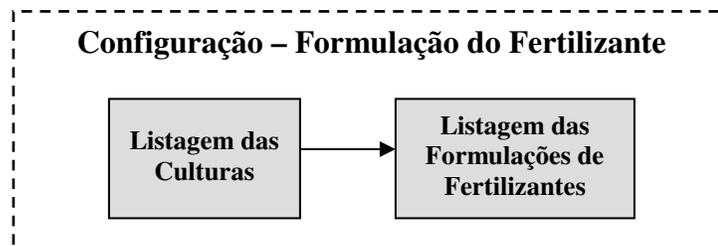


Figura 23: Representação da organização das rotinas de configuração da formulação do fertilizante

O banco de dados inicial conta com os fertilizantes utilizados durante o processo de desenvolvimento do equipamento. Posteriormente, tornar-se-á necessária a implementação de uma biblioteca com os fertilizantes mais utilizados em diversas culturas.

A escolha do tipo de fertilizante a ser utilizado é importante para a definição da densidade aparente. Este parâmetro é um dos fatores que influencia a taxa de aplicação, já que o sistema de dosagem opera aplicando um volume de fertilizante por unidade de área e as recomendações de aplicação são efetuadas em massa.

4.1.2.3 Espaçamento entre linhas

Após a conclusão da definição do fertilizante a ser utilizado é definido, pelo usuário, o espaçamento entre linhas adequado. Para isso, o operador deve, via teclado, digitar o valor do espaçamento entre as linhas de plantio. Esse dado é importante para a definição da taxa de aplicação de fertilizante na área plantada.

4.1.2.4 Velocidade de deslocamento do equipamento

A velocidade de deslocamento do equipamento foi simulada por um gerador de função, que teve como saída um sinal digital cuja frequência pode ser relacionada com a velocidade de deslocamento do equipamento.

4.2 Etapas do projeto

Para o melhor entendimento do processo de desenvolvimento do projeto este capítulo foi sub-dividido conforme ilustra o fluxograma definido na Figura 24.

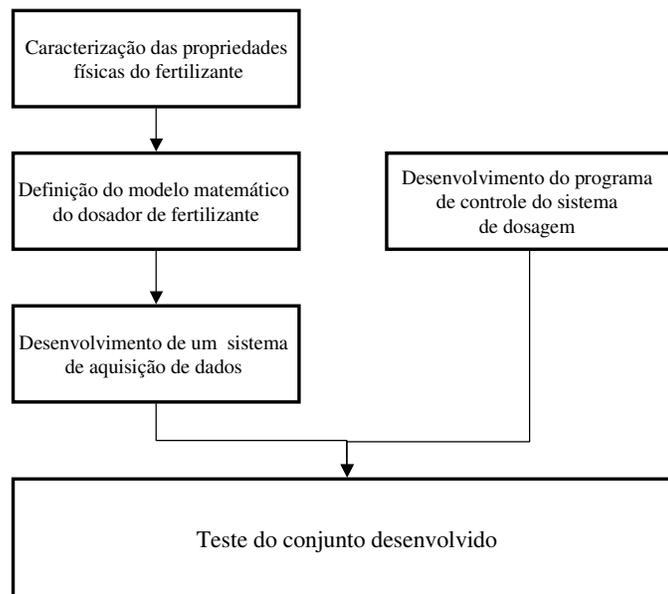


Figura 24: Fluxograma das fases de desenvolvimento do projeto

4.3 Caracterização das propriedades físicas do fertilizante

Para a realização do ensaio foi necessário definir as propriedades físicas dos fertilizantes utilizados no experimento. Os fertilizantes utilizados foram da marca Adubo Carajás Ltda. e durante os testes eles foram denominados como demonstrado na Tabela 4.

Tabela 4: Matérias-primas utilizadas na avaliação do dosador helicoidal (F1 à F3) e de avaliação e validação do sistema de controle (T1)

Denominação	Matérias-primas
F1	04-14-08 granulado
F2	03 - 19 -05 organo-mineral
F3	Superfosfato em pó
T1	10-10-10 granulado

Os parâmetros avaliados para a caracterização dos fertilizantes foram:

- Granulometria e diâmetro médio dos grânulos;
- Densidade aparente e densidade real;
- Ângulo de talude ou repouso.

4.3.1 Granulometria e diâmetro médio dos grânulos

Para a definição da granulometria foram realizados testes em triplicata para cada tipo de fertilizante e, posteriormente, foi calculada a média para a massa retida em cada peneira. Foram utilizadas peneiras da marca *Solotest* com malha que variam de 0,15 mm à 3,36 mm.

A pesagem do material depositado em cada uma das peneiras foi efetuada por uma balança eletrônica marca *DigitalScale*⁵, modelo BB3000, resolução de 0,1 g, com capacidade de 3000 g.

O diâmetro médio ponderado foi determinado segundo a metodologia apresentada por YOUKER e MCGUINNESS citado por KIEHL (1979) e calculado pela Equação (1):

⁵ Esta balança será utilizada em todos os procedimentos experimentais descritos a seguir

$$DMP = \sum C \times P \quad \dots (1)$$

Onde:

DMP é o diâmetro médio ponderado, em mm;

C é o tamanho dos furos das peneiras, em mm;

P é a proporção do peso do material retido em cada peneira, em relação ao peso total da amostra, adimensional.

4.3.2 Densidade aparente e densidade real

A densidade aparente e real foram obtidas utilizando-se uma proveta graduada de 500 ml e com escala de 10 ml da marca *Pyrex*.

A definição da densidade aparente foi obtida por meio da pesagem de 250 ml de fertilizante, sendo realizadas três repetições, e utilizando a equação descrita abaixo:

$$D_A = 10^3 \times \frac{m_f}{v} \quad \dots (2)$$

Onde:

D_A é a densidade aparente do fertilizante [$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$];

m é a massa medida de fertilizante [g];

v é o volume ocupado pelo fertilizante [ml].

A densidade real é a relação entre a massa do fertilizante em um determinado volume sendo descontado o volume ocupado pelos “vazios”. Para a obtenção da densidade real foi efetuada a pesagem de fertilizante em um determinado volume e, posteriormente, este volume foi preenchido com tolueno, para nova pesagem. Como é sabida a massa específica do tolueno pode definir o volume de líquido utilizado, com isso definir o volume de “vazios” a ser descontado para se obter a densidade real. Para o cálculo da densidade real foi utilizada a seguinte equação:

$$D_R = 10^3 \times \frac{m_f}{\left\{ v - \left[\frac{(m_f - m_t)}{D_t} \right] \right\}} \quad \dots (3)$$

Onde:

D_R é a densidade real do fertilizante [kg.m^{-3}];

m_f é a massa medida de fertilizante [g];

m_t é a massa medida de fertilizante e de tolueno [g];

v é o volume ocupado de fertilizante [ml].

D_t é a densidade do tolueno [g.ml^{-1}]

4.3.3 Ângulo de talude

O ângulo de talude de cada matéria-prima foi determinado pela medição da inclinação formada pela superfície de deposição natural dos produtos. Realizaram-se três medições para cada tipo de fertilizante e se calculou o ângulo de talude médio. A medição foi realizada por meio de uma bancada experimental modelo *Solids handling study bench*, da marca Armfield.

4.4 Definição do modelo matemático do dosador de fertilizante

4.4.1 Material

Os materiais utilizados no processo de definição do modelo do dosador de fertilizante serão definidos nos itens apresentados a seguir.

4.4.1.1 Mecanismo dosador de fertilizante

O mecanismo dosador que foi utilizado em conjunto com o sistema de controle é o equipamento desenvolvido pela empresa AGRIMAQ, modelo *Fertisystem*. A escolha deste tipo de mecanismo se deve ao fato de ser utilizado em grande parte dos equipamentos comerciais de dosagem de fertilizante. Já a escolha do modelo *Fertisystem* da AGRIMAQ

baseia-se no fato de ser um equipamento considerado de precisão pelo fabricante, isto é, supostamente possui uma uniformidade de aplicação adequada. A Figura 25 mostra o mecanismo dosador de fertilizante.

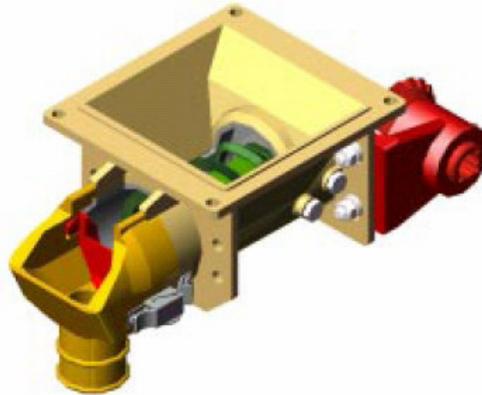


Figura 25: Sistema dosador de fertilizante *Fertisystem* (AGRIMAQ, 2005)

4.4.1.2 Velocidade de deslocamento

A velocidade de deslocamento do equipamento foi simulada utilizando-se um gerador de sinais marca *Aligent* modelo 33220A. Este equipamento é capaz de produzir 11 tipos de sinais com uma frequência máxima de 20 MHz. Além disso, tem como características (AGILENT, 2006):

- Forma de sinal tipo rampa, triângulo, ruído e sinais de corrente contínua;
- Gerador de pulso com variação do tipo de borda;
- Taxa de geração de 14-bit, 50 MSa/s, 64 k pontos para qualquer tipo de sinal gerado;
- Visualização gráfica do sinal gerado.

4.4.1.3 Microcontrolador

O microcontrolador utilizado no projeto é do modelo PIC16F877, do fabricante *Microchip*. O modelo apresenta as seguintes características (MICROCHIP, 2005):

- 368 bytes de RAM;
- 256 bytes de EEPROM;
- 33 portas de entrada ou saída;
- 2 saídas PWM de 10 bits;
- 8 canais conversores analógico-digital de 10 bits;
- 3 *Timers* (dois de 8 bits e um de 10 bits);
- 15 interrupções disponíveis.

Dada essa versatilidade, este componente foi ideal para o desenvolvimento deste projeto, pois forneceu suporte para que uma nova gama de funções seja implementada após a execução de projeto inicial, sendo ideal para pesquisa e desenvolvimento.

4.4.1.4 Placa de desenvolvimento

No protótipo, a placa utilizada é do fabricante EXSTO (Figura 26), com um microcontrolador do tipo PIC16F877.



Figura 26: Placa de desenvolvimento de aplicações am microcontroladores utilizada no projeto (EXSTO, 2005).

A placa de desenvolvimento tem as seguintes características (EXSTO, 2005):

- Circuito de gravação *on-board*;

- Interface de comunicação EIA-232 (RS232⁶);
- Relé de contato simples;
- Oscilador ajustável de 60 Hz a 5 kHz;
- *Buzzer* com *driver*;
- Tensão DC⁷ ajustável por potenciômetro;
- *Display* LCD⁸ com 16 colunas e 2 linhas ;
- Teclado matricial de 16 teclas;
- Quatro conectores de acesso aos portais do PIC;
- Memória EEPROM externa comunicação serial I2C;
- Compatível com compilador C da CCS a partir da Versão 3.148.
- Rotação do motor de acionamento do dosador

A rotação do eixo do motor foi definida pelo microcontrolador por meio dos dados previamente inseridos no sistema (taxa de aplicação e a densidade do fertilizante) e a velocidade de deslocamento do equipamento, obtida pelo sensor de velocidade. O controle do motor foi realizado por meio de modulação por largura de pulsos, mais conhecida como PWM. O microcontrolador escolhido já possui implementada essa função. Esses pulsos devem ser amplificados, utilizando um circuito de potência, para que possam suprir a demanda de potência do motor.

4.4.1.5 Circuito de potência

O circuito de potência é uma associação de componentes eletrônicos cuja função é, por meio de um sinal de entrada do tipo PWM, chavear a fonte de potência necessária para o acionamento do motor. O circuito de potência utiliza um transistor do tipo FET⁹, que tem uma grande rapidez na recuperação, podendo atuar com elevadas frequências de trabalho. O

⁶ RS-232C: *Recommended Standard-232C* – Interface padrão, aprovada pela Electronic Industries Alliance (EIA), para a conexão de dispositivos seriais.

⁷ DC - Corrente contínua, do inglês *DC Direct Current*.

⁸ LCD - Tela de cristal líquido, do inglês *Liquid Crystal Display*

⁹ FET - Transistor de Efeito de Campo, do inglês *Field Effect Transistor*.

modelo utilizado foi do tipo IRF640 da marca Fairchild, as principais características do transistor são descritas na Tabela 5.

Tabela 5: Características do transistor IRF640 utilizado no circuito de potência

Característica	Valor Máximo
Tensão	200 V
Corrente	18 A
Tempo de Recuperação	530 ns

Fonte: FAIRCHILD (2006).

4.4.1.6 Motorreductor de corrente contínua

Para o acionamento do mecanismo dosador foi utilizado um motorreductor de corrente contínua. Para o seu dimensionamento foi necessário estimar os valores de rotação e torque para o acionamento do mecanismo.

A rotação do dosador é definida pela taxa de aplicação necessária para o máximo rendimento econômico da cultura.

Nos ensaios preliminares realizados observou-se que a taxa de aplicação varia linearmente em função da rotação do eixo do motor de acionamento. A variação unitária desta velocidade angular [rad.s⁻¹] representa um acréscimo de 2,67 [g.s⁻¹] na taxa de aplicação.

Utilizando os parâmetros das Tabela 1 e os dados de produtividade fornecidos pelo IBGE¹⁰ (item 3.2 Importância da aplicação uniforme de fertilizantes) pode-se determinar a taxa de aplicação, Tabela 6, para cada cultura utilizando a equação abaixo:

$$Q = 10^{-3} \times p \times t \times ie \quad \dots (4)$$

Onde:

Q é a taxa de aplicação [kg.ha⁻¹];

p produtividade média da cultura [kg.ha⁻¹];

¹⁰ IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

t quantidade de fertilizante a ser aplicado por tonelada de produto produzido [kg.ton⁻¹];

ie índice de exportação.

Tabela 6: Estimativa da quantidade de nutrientes a ser aplicado nas culturas de feijão, milho, amendoim e arroz em kg.ha⁻¹.

Cultura	Feijão	Amendoim	Milho	Arroz
Nutriente				
N	30,4	119,1	58,6	39,8
P₂O₅	6,3	23,3	35,0	22,8
K₂O	16,9	35,0	22,2	14,9
Total	53,6	208,6	115,9	77,5

A este parâmetro foi utilizado como limite inferior de rotação entregue pelo motor ao eixo do dosador de fertilizante.

Tabela 7 mostra a rotação necessária para as demandas de fertilizantes estimadas anteriormente. Pode-se observar que valor máximo de rotação é de 5,43 rad⁻¹ (52 min⁻¹), este parâmetro foi utilizado como limite inferior de rotação entregue pelo motor ao eixo do dosador de fertilizante.

Tabela 7: Rotação do eixo do motor em rad.s⁻¹. Entre parênteses estão expressas a rotação em min⁻¹.

	Feijão	Amendoim	Milho	Arroz
Rotação	1,40 (13)	5,43 (52)	3,02 (29)	2,02 (19)

Para se determinar a demanda de potência do dosador que foi utilizado experimentalmente foram efetuados testes preliminares conforme ilustra a Tabela 8.

Tabela 8: Dados obtidos no ensaio preliminar para a determinação da potência e torque requerido pelo dosador de fertilizante

Operação	Rotação [min ⁻¹]	Rotação [rad.s ⁻¹]	Tensão [V]	Corrente [A]	Potência [W]	Torque [N.m]	Torque [kgf.cm]
Carga	56	5,86	12	12,6	151	26	263
Vazio	56	5,86	12,05	10,13	122	21	212

Observando os dados apresentados na Tabela 8 pode-se determinar a potência entregue ao equipamento pelo motor, que é a diferença entre o motor operando em vazio e operando com carga. Com isso, a potência entregue ao motor foi de 29 W.

Definidas a rotação e a potência necessárias para o acionamento do mecanismo pôde-se selecionar o motor.

O motor selecionado foi o modelo M210-120, marca MOTRON. Este equipamento consiste em um motor de corrente contínua acoplado a um sistema de redução (motorreductor). A Tabela 9 descreve as características técnicas e a Figura 27 ilustra as dimensões do equipamento.

Tabela 9: Características técnicas do motorreductor M210-120, marca Motron.

Modelo	Volts [V]	Sem Carga		Máxima eficiência					Torque Travado [kgf.cm]
		Rotação [min ⁻¹]	Corrente [A]	Rotação [min ⁻¹]	Corrente [A]	Torque [kgf.cm]	Potência [W]		
							Consumo	Entrega	
MR 210-120	24	120	1,5	108	5,6	42	134	45	225

Fonte: MOTRON (2005)

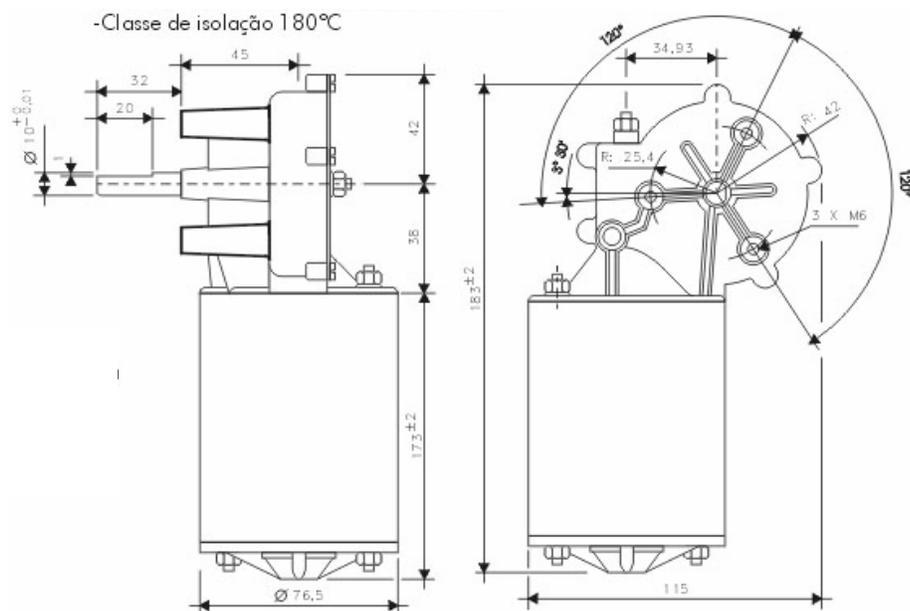


Figura 27: Dimensões do motorreductor selecionado (MOTRON, 2005)

4.4.2 Planejamento Experimental

A metodologia utilizada para a realização dos ensaios foi uma adaptação da norma ASAE S341.2 DEC92. Essa norma descreve o procedimento para definir a uniformidade da distribuição de fertilizantes em um espalhador a lanço. Já para a definição do modelo experimental do dosador de fertilizante foi utilizado o planejamento fatorial apresentado por BARROS NETO *et al.* (2002).

A modelagem matemática do dosador de fertilizante foi obtida por meio dos modelos: fatorial, central composto - linear e central composto – quadrático.

4.4.2.1 Planejamento Experimental do Modelo do Dosador de Fertilizante

Considerando-se que, neste experimento, três fatores influenciam o comportamento da taxa de aplicação de fertilizante pelo dosador (variável dependente), o planejamento experimental utilizado foi o planejamento multivariado. Os fatores que influenciaram (variáveis independentes) a taxa de aplicação foram: a densidade do fertilizante utilizado, o sinal de *duty cycle* e a altura de adubo no reservatório (como visto em fatores que influenciam

a taxa de aplicação item 3.2.1). Neste estudo foi utilizado um planejamento fatorial do tipo 2^3 apresentado por BARROS NETO *et al.* (2002).

4.4.2.1.1 Planejamento fatorial

Primeiramente foi considerada que a superfície da resposta obtida experimentalmente é uma função linear, e que a resposta pode ser estimada pela equação:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \quad \dots (5)$$

Onde:

b_0 , b_1 e b_2 são estimadores dos valores do modelo;

x_1 e x_2 representam os valores dos fatores codificados;

\hat{y} é a resposta obtida pela variação dos dois valores codificados.

O planejamento adotado contém um ponto central além dos dois pontos de cada fator. Com isso, pode ser verificado se há ajuste para o modelo linear proposto. A Tabela 10 apresenta os níveis adotados para cada fator e seus valores absolutos.

Tabela 10 - Níveis e valores absolutos dos fatores. Planejamento linear.

	X_1 [kg.m ⁻³]			X_2 [%]			X_2 [m]		
Valores dos níveis	-1	0	+1	-1	0	+1	-1	0	+1
Valores absolutos	0,73	0,87	1,04	30	50	70	0,10	0,20	0,30

A matriz X foi obtida utilizando os valores da matriz de planejamento, conforme ilustra a Tabela 11.

Tabela 11 - Resultado do planejamento fatorial 2^3 com cinco repetições no nível central.

<i>Ensaio</i>	X_1	X_2	X_3	Y
1	-1,00	-1,00	-1,00	y_1
2	-1,00	1,00	-1,00	y_2
3	-1,00	-1,00	1,00	y_3
4	-1,00	1,00	1,00	y_4
5	1,00	-1,00	-1,00	y_5
6	1,00	1,00	-1,00	y_6
7	1,00	-1,00	1,00	y_7
8	1,00	1,00	1,00	y_8
9	-1,68	0,00	0,00	y_9
10	1,68	0,00	0,00	y_{10}
11	0,00	-1,68	0,00	y_{11}
12	0,00	1,68	0,00	y_{12}
13	0,00	0,00	-1,68	y_{13}

A primeira coluna da matriz X representa o valor de b_0 , e as outras apresentam os valores dos fatores. Neste caso a matriz X será dada por:

$$X = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

O valor dos resultados obtidos para cada combinação dos fatores é definido pela matriz abaixo.

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \\ y_{10} \\ y_{11} \\ y_{12} \\ y_{13} \end{bmatrix}$$

4.4.2.1.2 Planejamento central composto - Linear

Neste planejamento foram considerados os valores dos pontos rotacionados. A superfície da resposta obtida experimentalmente é uma função linear, e que a resposta é estimada pela equação:

$$\hat{y} = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 \quad \dots (6)$$

Onde:

b_0 , b_1 e b_2 são estimadores dos valores do modelo;

x_1 e x_2 representam os valores dos fatores codificados;

\hat{y} é a resposta obtida pela variação dos dois valores codificados.

Diferente do planejamento anterior, este planejamento adotou pontos axiais além do ponto central e dos dois pontos de cada fator. A Tabela 12 apresenta os níveis adotados para cada fator e seus valores absolutos.

Tabela 12: Níveis e valores absolutos dos fatores. Planejamento central composto - Linear

Valores	X_1 [g.ml^{-1}]					X_2 [%]					X_2 [m]				
	-1,682	-1	0	+1	+1,682	-1,682	-1	0	+1	+1,682	-1,682	-1	0	+1	+1,682
Níveis	-1,682	-1	0	+1	+1,682	-1,682	-1	0	+1	+1,682	-1,682	-1	0	+1	+1,682
Absolutos	0,62	0,73	0,87	1,04	1,15	16,36	30	50	70	83,64	0,03	0,10	0,20	0,30	0,37

Neste planejamento puderam ser aproveitados todos os ensaios realizados no experimento anterior, apenas acrescentando-se os novos ensaios rotacionados. Os ensaios para o modelo quadrático foram conduzidos de acordo com as combinações da Tabela 13.

Tabela 13: Planejamento central composto - linear com cinco repetições no nível central.

<i>Ensaio</i>	X_1	X_2	X_3	Y
1	-1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	-1	y_2
3	-1	+1	-1	y_3
4	+1	+1	+1	y_4
5	-1	-1	+1	y_5
6	+1	-1	+1	y_6
7	-1	+1	+1	y_7
8	+1	+1	+1	y_8
9	-1,682	0	0	y_9
10	+1,682	0	0	y_{10}
11	0	-1,682	0	y_{11}
12	0	+1,682	0	y_{12}
13	0	0	+1,682	y_{13}
14	0	0	-1,682	y_{14}
15	0	0	0	y_{15}
16	0	0	0	y_{16}
17	0	0	0	y_{17}
18	0	0	0	y_{18}
19	0	0	0	y_{19}

Com os valores da tabela acima foi obtida a matriz dos coeficientes X :

$$X = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & -1,68 & 0 & 0 \\ +1 & +1,68 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & -1,68 & 0 \\ +1 & 0 & +1,68 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & +1,68 \\ +1 & 0 & 0 & -1,68 \\ +1 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

O valor dos resultados obtidos para cada combinação dos fatores foi definido pela matriz abaixo.

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ y_3 \\ y_4 \\ y_5 \\ y_6 \\ y_7 \\ y_8 \\ y_9 \\ y_{10} \\ y_{11} \\ y_{12} \\ y_{13} \\ y_{14} \\ y_{15} \\ y_{16} \\ y_{17} \\ y_{18} \\ y_{19} \end{bmatrix}$$

4.4.2.1.3 Planejamento central composto - Quadrático

O planejamento de dois níveis, descrito no item anterior, permitiu a obtenção de um modelo linear. Contudo, houve situações onde o modelo linear não descreveu adequadamente o modelo estudado, com isso, tornou-se necessário realizar um modelo experimental do tipo quadrático, conforme se observa na equação abaixo.

$$\hat{y}(x_1, x_2) = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 - b_3 X_2 - b_4 X_1^2 + b_5 X_2^2 + b_6 X_2^2 + b_7 X_1 X_2 + b_8 X_1 X_3 + b_9 X_2 X_3 \dots (7)$$

A Tabela 14 mostra os valores absolutos dos níveis para cada fator a ser estudado.

Tabela 14: Níveis e valores absolutos dos fatores. Planejamento central composto - quadrático.

Valores	X_1 [g.ml ⁻¹]					X_2 [%]					X_3 [m]				
	Níveis	-1,682	-1	0	+1	+1,682	-1,682	-1	0	+1	+1,682	-1,682	-1	0	+1
Absolutos	0,62	0,73	0,87	1,04	1,15	16,36	30	50	70	83,64	0,03	0,10	0,20	0,30	0,37

Neste planejamento podem ser aproveitados todos os ensaios realizados no experimento anterior. Os ensaios para o modelo quadrático foram conduzidos de acordo com as combinações da Tabela 15.

Tabela 15 - Planejamento central composto - quadrático com cinco repetições no nível central.

<i>Ensaio</i>	X_1	X_2	X_3	X_1	X_1	X_1	$X_1 X_2$	$X_1 X_3$	$X_2 X_3$	Y
1	-1,00	-1,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	y_1
2	-1,00	1,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	-1,00	1,00	-1,00	y_2
3	-1,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-1,00	-1,00	y_3
4	-1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-1,00	-1,00	1,00	y_4
5	1,00	-1,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	-1,00	-1,00	1,00	y_5
6	1,00	1,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-1,00	-1,00	y_6
7	1,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-1,00	1,00	-1,00	y_7
8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	y_8
9	-1,68	0,00	0,00	2,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	y_9
10	1,68	0,00	0,00	2,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	y_{10}
11	0,00	-1,68	0,00	0,00	2,83	0,00	0,00	0,00	0,00	y_{11}
12	0,00	1,68	0,00	0,00	2,83	0,00	0,00	0,00	0,00	y_{12}
13	0,00	0,00	-1,68	0,00	0,00	2,83	0,00	0,00	0,00	y_{13}
14	0,00	0,00	1,68	0,00	0,00	2,83	0,00	0,00	0,00	y_{14}
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	y_{15}
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	y_{16}
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	y_{17}
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	y_{18}
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	y_{19}

Com esta tabela, obtém-se a matriz dos coeficientes X será:

$$X = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & -1 \\ +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & -1,682 & 0 & 0 & +2,829 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & +1,682 & 0 & 0 & +2,829 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & -1,682 & 0 & 0 & +2,829 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & +1,682 & 0 & 0 & +2,829 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & -1,682 & 0 & 0 & +2,829 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & +1,682 & 0 & 0 & +2,829 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

4.4.2.1.4 Cálculo dos coeficientes dos modelos matemáticos

O cálculo dos coeficientes do modelo matemático empírico pode ser determinado utilizando-se a equação:

$$b = (X'X)^{-1} X'y \quad \dots (8)$$

onde:

- b são os coeficientes do modelo matemático empírico;
- X é a matriz dos coeficientes de contraste;
- y é o vetor coluna com os resultados dos experimentos.

Substituindo os valores dos fatores na matriz X e obtendo-se os resultados para a matriz y será possível calcular os estimadores (b).

Posteriormente, para o cálculo da equação com os valores dos fatores em termos dos parâmetros físicos. Para isso foi necessária a decodificação dos fatores, por meio da equação a seguir pode-se definir o valor físico para cada valor codificado.

$$Y = \left(X_i \times \left(\frac{Y_{i,-1} - Y_{i,+1}}{2} \right) \right) + \left(\frac{Y_{i,-1} + Y_{i,+1}}{2} \right) \quad \dots (9)$$

Onde:

X_i são os fatores codificados;

$Y_{i,-1}$ e $Y_{i,+1}$ são os valores físicos dos fatores i codificados -1 e +1, respectivamente;

Y é o valor do fator decodificado.

4.4.2.1.5 Análise de variância

Utilizando os resultados obtidos nos pontos centrais dos fatores pode-se encontrar o valor do desvio padrão (s). Com isso, pode-se obter uma estimativa da variância dos elementos do vetor b .

$$\hat{V}(b) = (X^T X)^{-1} \times s^2 \quad \dots (10)$$

Onde,

X é a matriz dos coeficientes de contraste;

s é o desvio padrão no ponto central;

\hat{V} é a variância .

Para a realização da análise de variância de um modelo utilizou-se a decomposição algébrica dos desvios das repostas observadas em relação à média global. A Figura 28 ilustra a decomposição do desvio de uma observação em relação à média global, na qual se pode verificar o significado de cada termo utilizado para a realização do teste de análise de variância.

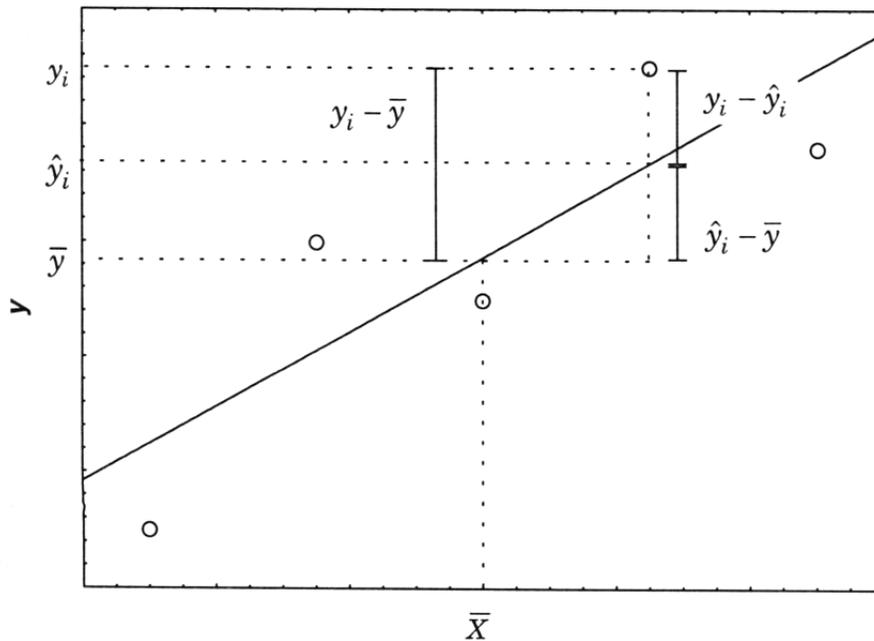


Figura 28: Decomposição do desvio de uma observação em relação à média global (BARROS NETO, 2005).

A Tabela 16 apresenta as equações utilizadas para a análise da variância para o ajuste do modelo encontrado.

Tabela 16: Análise da variância, pelo método de mínimos quadrados, sendo: n_i = número de repetições no nível i ; m = número de níveis distintos da variável independente; $n = \sum n_i$ = número total de observações; p = número de parâmetros do modelo.

Fonte de Variação	Soma quadrática	N ^o de g. l.	Média quadrática
Regressão	$SQ_R = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$p - 1$	$MQ_R = \frac{SQ_R}{p - 1}$
Resíduos	$SQ_r = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \hat{y}_i)^2$	$n - p$	$MQ_r = \frac{SQ_r}{n - p}$
Falta de ajuste	$SQ_{faj} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (\hat{y}_i - \bar{y}_i)^2$	$m - p$	$MQ_{faj} = \frac{SQ_{faj}}{m - p}$
Erro puro	$SQ_{ep} = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y}_i)^2$	$n - m$	$MQ_{ep} = \frac{SQ_{ep}}{n - m}$
Total	$SQ_T = \sum_i^m \sum_j^{n_i} (y_{ij} - \bar{y})^2$	$n - 1$	
% de variação explicada			$\frac{SQ_R}{SQ_T}$
% de variação explicável			$\frac{SQ_T - SQ_{ep}}{SQ_T}$

4.4.2.1.6 Significância estatística da regressão

O método utilizado para avaliar numericamente a qualidade do ajuste do modelo foi a avaliação do coeficiente de determinação. A análise estatística foi realizada pelo cálculo do teste F considerando-se a razão entre a média quadrática da regressão, MQ_R , e a média quadrática dos resíduos, MQ_r , conforme se observa na equação abaixo:

$$F = \frac{MQ_R}{MQ_r} \quad \dots (11)$$

Onde:

MQ_R é a média quadrática da regressão;

MQ_r é a média quadrática dos resíduos.

A estatística “F” calculada foi comparada com o valor tabelado para os graus de liberdade de MQ_R e de MQ_r , adotado um nível de significância estatística.

A falta de ajuste pode ser obtida utilizando o teste F, isto é, comparar o valor de F tabelado com o valor calculado pela equação:

$$F = \frac{MQ_{faj}}{MQ_{ep}} \quad \dots (12)$$

Onde:

MQ_{faj} é a média quadrática da falta de ajuste;

MQ_{ep} é a média quadrática do erro puro.

4.5 Sistema de aquisição de dados

Para o monitoramento da taxa de aplicação do sistema de controle em tempo real foi desenvolvido um sistema de aquisição de dados, baseado no sistema utilizado por MARTINS (1999), utilizando uma célula com um anteparo à 45° de inclinação, como ilustra a Figura 42. Este anteparo foi necessário para garantir impacto na placa que produziu a deformação da célula de carga e o escoamento do produto sem que ocorresse sua retenção. A aquisição dos dados foi efetuada por meio de uma placa de aquisição modelo NI 6034E, marca *National Instruments*. Para a coleta dos dados foi utilizado um programa desenvolvido em *LabView 7.1*.

4.5.1 Sistema físico de aquisição

O sistema físico de aquisição foi constituído por uma célula de carga modelo PW4KC3, marca HBM. A capacidade da célula de carga é de 300 g, a resolução é de 1 mV/V

de alimentação. A alimentação da célula de carga foi realizada por meio de uma fonte de corrente contínua de 12 V.

Como o sinal de saída da célula de carga apresenta uma variação muito pequena de tensão, houve a necessidade de um amplificador de sinal. Para isso utilizou-se um amplificador modelo INA125P da marca *Burr-Brown* que tem como principais características (BURR-BROWN, 2006):

- Faixa de trabalho entre 2,7 e 18V;
- Ganho regulável em função de uma resistência de controle;
- Ganho entre 4 e 1000 vezes.

4.5.2 Calibração de célula de carga

Os dados coletados pelo sistema de instrumentação e aquisição foram exportados para um arquivo formato “txt”. Neste arquivo os dados referentes aos sinais do sensor de vazão mássica instantânea e do tempo foram dispostos em colunas para a realização de um pós-processamento.

Para a calibração da célula de carga se variou o fluxo de massa do dosador e efetuou-se a coleta de dados do sinal de saída da célula de carga. Posteriormente a passagem pelo anteparo da célula de carga massa de fertilizante foi coletada e pesada. A taxa de aplicação foi definida pela massa de fertilizante coletada e o tempo medido.

Para se definir a relação entre o sinal gerado pela célula de carga e o fluxo de massa utilizou-se a média do RMS¹¹ real dos dados coletados.

4.6 Desenvolvimento do programa de controle do sistema de dosagem

Com os parâmetros de projeto definidos nos itens 4.1 e 4.4 pode-se desenvolver o programa de controle do sistema. O *software* foi escrito em linguagem C devido à maior facilidade de programação. O compilador utilizado foi o *CCS C Compiler, versão 7.3*, e para a gravação do PIC utilizou-se o *software* de gravação fornecido pelo fabricante do kit de desenvolvimento *SEDx201*. A utilização destes programas se deveu à compatibilidade entre

¹¹ RMS média quadrática - do inglês: *root mean square*

esses softwares e a placa de desenvolvimento, sem necessidade de adaptações e utilização de outras ferramentas tanto de software quanto de hardware para a execução do projeto.

No período de desenvolvimento do programa foi utilizado o *software Proteus, versão 6.0*, para realizar simulações. Com isso, pode-se verificar o funcionamento do programa e possíveis erros. A Figura 29 ilustra o esquema construído virtualmente para a realização de testes de funcionamento.

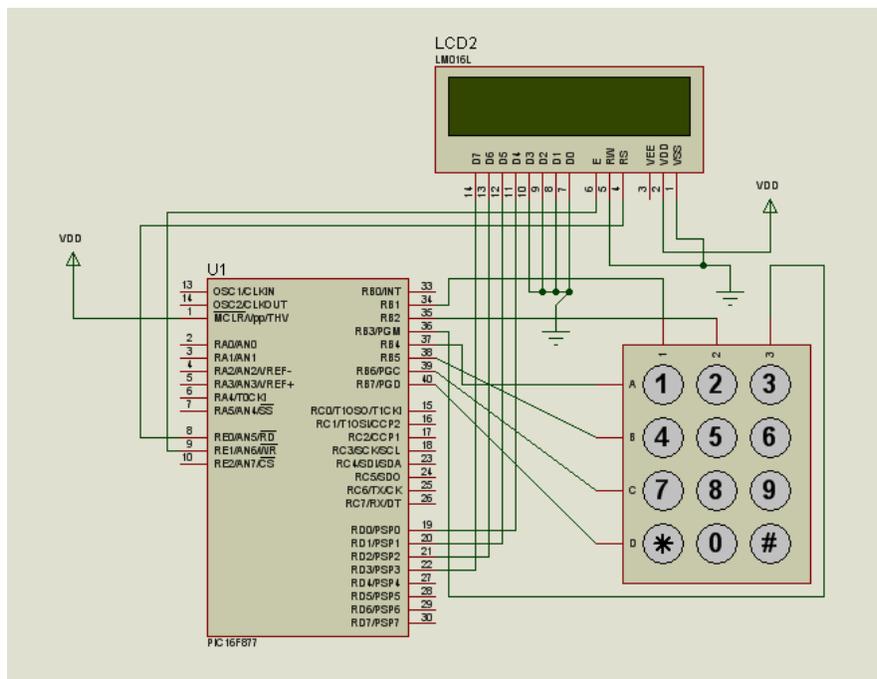


Figura 29: Esquema da simulação do programa desenvolvido utilizando o *software Proteus*.

Para maior facilidade no desenvolvimento do *software* optou-se em dividi-lo em partes menores. Posteriormente, com as partes desenvolvidas, foi implementado todo o sistema em um único programa.

4.6.1 Display LCD

A estrutura dessa parte do *software* foi baseada na interface homem-máquina (IHM). A visualização das informações necessárias, a serem fornecidas pelo operador, para as configurações do controlador é feita por meio de um *display* LCD, conforme ilustra a Figura 30.

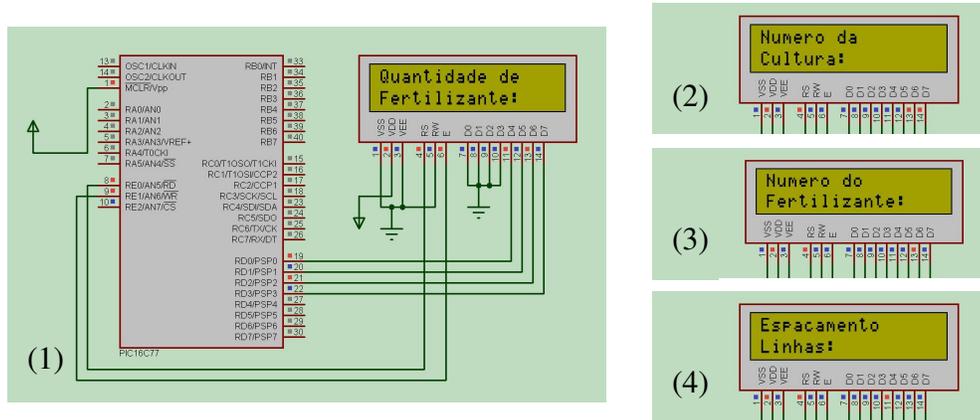


Figura 30: Visualização do programa, simulada no *software Proteus*, do LCD da seqüência de parâmetros requeridos pelo sistema. (1) quantidade de fertilizante; (2) número da cultura; (3) número do fertilizante; (4) espaçamento entre linhas.

4.6.2 Teclado Matricial

A inserção dos dados foi realizada via digitação. Para isso foi utilizado um teclado do tipo matricial. Este teclado possui 12 chaves, como ilustra a Figura 31 que funcionam como botões sendo definidos como números de 0 até 9, botão “corrige” e botão “confirma”.

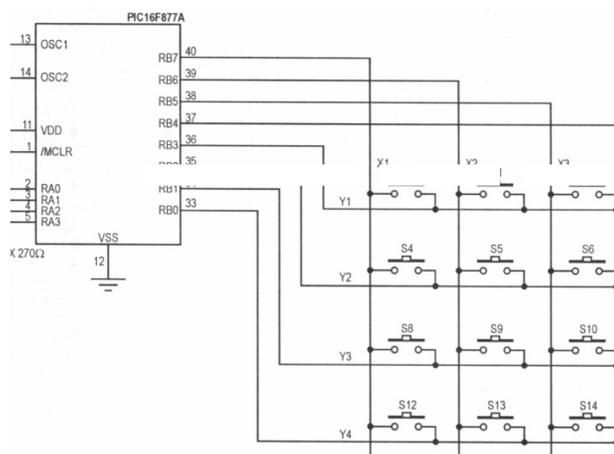


Figura 31: Esquema eletrônico do teclado matricial (ZANCO, 2006)

Para a correta leitura dos dados inseridos pelo usuário a partir do teclado, foi realizada uma modificação na biblioteca fornecida pelo fabricante da placa, com o objetivo de incluir *debounce*¹², que é o processo de apenas registrar que uma tecla foi pressionada a partir do momento em que se detecta que ela é solta após ser verificada a pressão.

Além disso, foi incluída a possibilidade de retroceder em caso de erro na digitação de algum valor por parte do usuário. O sistema recebe e confirma a inserção dos dados com uma mensagem ao usuário.

4.6.3 Aquisição do sinal de velocidade de deslocamento

A segunda parte do programa desenvolvida foi a obtenção da velocidade de deslocamento a partir da contagem dos pulsos emitidos por um gerador de sinal (como descrito no item 4.1.2.4). O gerador de sinal fornece um número determinado de pulsos que são lidos por uma das entradas do microcontrolador que, com uma rotina específica, é capaz de contar o número de pulsos gerados, obter sua frequência e, conseqüentemente, a velocidade de deslocamento do equipamento. Para fazer o cálculo da frequência foi utilizado o contador interno do PIC, *Timer 1*. Para garantir uma correta contagem dos pulsos, também foi incluído *debounce* nesta seção. A Figura 32 ilustra a simulação realizada no programa *Proteus* utilizando um gerador de sinais (a) para fornecer os pulsos de entrada que são registrados pelo microcontrolador. Para verificar se o microcontrolador realizava de forma correta a contagem dos pulsos utilizou-se um contador digital (b) que media a frequência lida pelo microcontrolador.

¹² *debounce* são temporizadores com objetivo de oferecer imunidade contra transitórios rápidos que possam, de outra forma, causar a ativação momentânea de uma entrada.

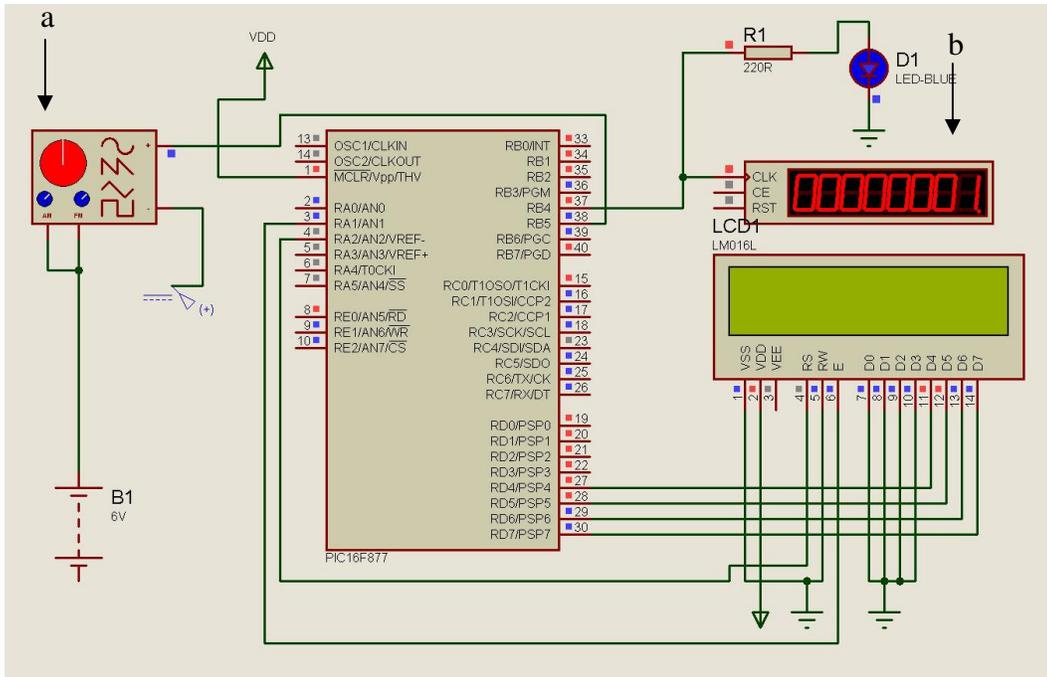


Figura 32: Visualização da simulação realizada no programa *Proteus* do sinal de deslocamento do equipamento (a) gerador de sinal; (b) contador de pulsos

4.6.4 Sinal de controle - PWM

O sistema de controle forneceu um sinal PWM com a largura do pulso (*duty cycle*) variando em função dos parâmetros de entrada descritos no item 4.1..

O período do sinal PWM no microcontrolador foi definido diretamente pelo *Timer 2*, isto é, sempre que este contador estourou houve uma interrupção que deu início a um novo ciclo. A dimensão do *Timer 2* pode ser configurada pelo usuário por meio do registrador *PR2*. O período do PWM é obtido pela equação:

$$T = [(PR2) + 1] \times 4 \times T_{osc} \times (P_TMR2) \quad \dots (13)$$

Onde:

T é o período do PWM;

$PR2$ é o registrador de até 8 bits;

T_{osc} é a período de oscilação do ciclo do controlador;

P_TMR2 é o *prescaler*¹³ TMR2.

Houve a necessidade da mudança de escala, pois nos testes efetuados para determinar a resposta do motor quanto ao *duty cycle*¹⁴, este foi variado de 0 a 100, enquanto que a função geradora do sinal de controle recebe essa dimensão em uma faixa de valores de 0 a 255.

O valor do *duty cycle* do sinal de saída é obtido por meio do modelo matemático do dosador (item 4.4). Além disso, para o cálculo correto do *duty cycle* deve-se considerar a velocidade de deslocamento do equipamento. Para isso, foi implementada a rotina de controle, que faz uso de interrupção por estouro do contador do microcontrolador (item anterior).

A verificação desta parte do programa foi realizada utilizando o programa *Proteus*. A Figura 33 ilustra o sinal de saída (a) do microcontrolador (b) medida por um osciloscópio (c).

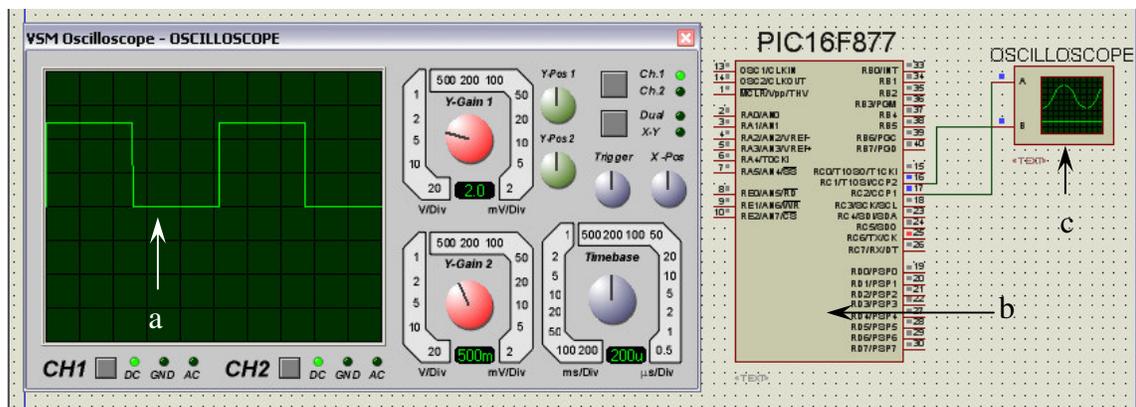


Figura 33: Visualização da simulação realizada no programa *Proteus* do sinal PWM gerado pelo microcontrolador e medido por um osciloscópio; (a) sinal PWM; (b) microcontrolador; (c) osciloscópio

4.7 Avaliações do protótipo

¹³ *Prescaler*: Multiplicador configurável de incremento dos *Timers* do microcontrolador.

¹⁴ *Duty cycle*: Num fenômeno periódico, é a porcentagem de tempo que a onda permanece no nível em relação ao tempo total de um ciclo.

4.7.1 Teste preliminar

Com o objetivo de verificar se o sinal PWM de saída do controlador era compatível com o sinal esperado foi realizado um teste preliminar. Para isso, utilizou-se um osciloscópio marca *Agilente*, modelo 54622D¹⁵ acoplado no pino de saída de sinal PWM do microcontrolador. A Figura 34 ilustra o teste realizado para a validação do sinal de saída do programa de controle.



Figura 34: Esquema da montagem do teste preliminar do sinal de saída do programa de controle

4.7.2 Teste de laboratório

A norma ASAE S341.2 DEC92 prevê a necessidade da realização de testes em laboratório com seguintes condições listadas a seguir.

Antes do teste devem ser definidos:

- As características físicas do fertilizante utilizado;

¹⁵ Principais características: *Mixed-Signal* de 100 megahertz (MSO), dois canais de entrada, 4MB da memória com 32 níveis da intensidade e 25 milhão pontos/segundo.

- A capacidade do reservatório de fertilizante do equipamento;
- A taxa de aplicação de fertilizante desejada.

O procedimento para a realização do teste seguiu alguns parâmetros:

- O teste foi iniciado somente depois que o dosador estabilizou o fluxo de distribuição do fertilizante;
- O reservatório do dosador foi preenchido no dia do teste;
- O teste foi conduzido no mínimo 10 minutos depois do preenchimento do reservatório e no máximo 4 horas após;
- O reservatório foi preenchido entre 40 e 50% de sua capacidade.

A avaliação do protótipo deste trabalho foi realizada no Laboratório de Instrumentação e Controle – LIC da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas e foi dividido em duas partes: teste estático e teste dinâmico.

4.7.2.1 Teste estático

O objetivo deste teste foi verificar o erro na taxa de aplicação de fertilizante quando sistema se encontra em regime permanente. No teste estático o sinal de entrada, que simula a velocidade de deslocamento do equipamento permaneceu constante. Foram realizados testes com diferentes taxas de aplicação de fertilizante e foi verificada a saída de fertilizante realizada pelo dosador. Neste teste se avaliou a variação do fluxo de massa depositado pelo dosador em função da velocidade simulada e verificar o desvio médio relativo (equação 14) em função da taxa de aplicação configurada pelo usuário.

$$DMR = 100 \times \frac{|T_i - T_o|}{T_i} \quad \dots (14)$$

Onde:

DMR é o desvio médio relativo [%];

T_i é a taxa de aplicação definida pelo usuário [$\text{kg} \cdot \text{ha}^{-1}$];

T_o é a taxa de aplicação efetuada pelo sistema dosador [$\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$].

A taxa de aplicação efetuada pelo sistema foi obtida por meio da pesagem da massa de fertilizante aplicada e do tempo. Além disso, foram utilizados os parâmetros da configuração inicial do sistema. A taxa de aplicação de saída do dosador foi obtida pela equação:

$$T_o = \frac{1}{10} \times v \times e \times \frac{m}{t} \quad \dots (15)$$

Onde:

v é a velocidade de deslocamento do equipamento [$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$];

e é o espaçamento entre as linhas de plantio [m];

m é a massa medida na saída do dosador [g];

t é o tempo de duração medida em cada ensaio [s];

T_o é a taxa de aplicação na saída do dosador [$\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$].

Os ensaios foram realizados em triplicata e os valores de m e t foram obtidos pela média dos três testes efetuados para cada configuração do experimento.

4.7.2.2 Teste dinâmico

No teste dinâmico, a velocidade de rotação do eixo do motor foi variável. O objetivo deste teste foi a análise do tempo de resposta do sistema projetado às variações de velocidade simuladas durante o ensaio.

A metodologia utilizada neste teste foi desenvolvida por UMEZU (2003). Este método consiste em empregar sinais de excitação na entrada do motor para que se possa testar o comportamento do sistema. Para isso foi empregado sinal de excitação do tipo degrau que simula o sinal de entrada do sistema de controle, no caso, a rotação obtida pelo sensor de velocidade. Este teste é o pior caso que pode ser obtido no campo, isto é, simula uma aceleração abrupta do equipamento.

No ensaio com um sinal de excitação do tipo degrau, conforme ilustra o gráfico da Figura 35, pode-se avaliar as características de desempenho do sistema tais como: erro em regime permanente, tempo de subida, de descida.

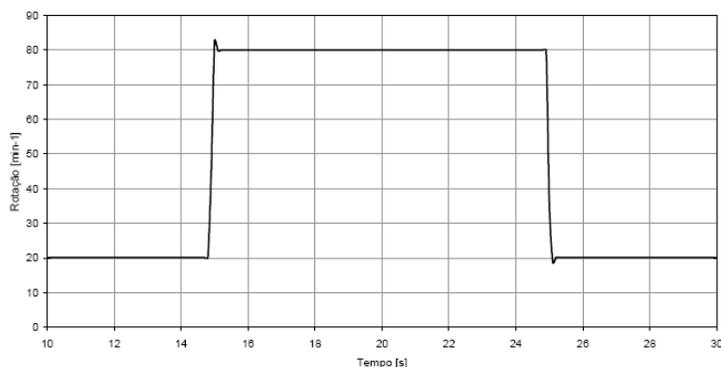


Figura 35: Excitação do tipo degrau, expresso em valores de rotação (UMEZU, 2003)

4.7.3 Forma de análise dos resultados

A avaliação do desempenho do dosador foi realizada considerando os seguintes fatores:

- Homogeneidade de aplicação;
- Homogeneidade de aplicação a uma velocidade de deslocamento constante;
- Homogeneidade de aplicação com variação da velocidade de deslocamento;
- Verificação da correspondência entre a taxa de aplicação real e a taxa nominal;
- Levantamento de custos de produção de um protótipo.

4.7.3.1 Análise dos dados obtidos

A homogeneidade da aplicação de fertilizante foi obtida por meio do desvio padrão que é o grau de dispersão dos dados numéricos em torno de um valor médio. O cálculo do valor do desvio padrão foi realizado pela equação abaixo:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_i (X_i - \bar{X})^2}{n-1}} \quad \dots (16)$$

Onde:

s é o desvio padrão [g.s⁻¹];

X_i é o valor do i-ésimo dado de taxa de aplicação [g.s⁻¹];

\bar{X} é o valor médio da taxa de aplicação [g.s⁻¹];

n é o número total de dados.

O coeficiente de variação representa a dispersão dos dados de uma amostra em relação à sua média e foi calculado conforme a equação:

$$CV = \frac{s}{\bar{X}} \cdot 100 \quad \dots (17)$$

Onde:

CV é o coeficiente de variação [%];

s é o desvio padrão [g.s⁻¹];

\bar{X} é o valor médio da taxa de aplicação [g.s⁻¹].

4.7.3.2 Custos de Produção

O levantamento do custo de produção do protótipo foi definido por meio de cotações de cada parte do equipamento. Além disso, levantou-se o custo da mão-de-obra para montagem das partes do sistema.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos experimentalmente para verificar e validar os objetivos propostos.

5.1 Propriedades das matérias-primas

As propriedades físicas dos fertilizantes utilizados foram determinadas conforme a metodologia proposta. Primeiramente foi determinada a granulometria de cada uma das matérias-primas, conforme apresentado nas Tabela 17, Tabela 18, Tabela 19 e Tabela 20.

Tabela 17: Granulometria do fertilizante F1 obtida em cada ensaio, a média [g] e a percentagem retida em cada peneira em relação à massa total [%]

Granulometria	<0,15	0,15	0,297	0,6	1,19	2	2,38	<3,36
1	0,5	2,6	53,1	9,6	6,2	2	4,5	19
2	2,8	14,3	46,7	10,2	6,9	2,1	4,7	10,4
3	6	14,15	44,45	9,8	7,35	2,15	4,85	10,25
Média	3,10	10,35	48,08	9,87	6,82	2,08	4,68	13,22
% da massa total	3,16	10,54	48,96	10,05	6,94	2,12	4,77	13,46

Tabela 18: Granulometria do fertilizante F2 obtida em cada ensaio, a média [g] e a percentagem retida em cada peneira em relação à massa total [%]

Granulometria	<0,15	0,15	0,297	0,6	1,19	2	2,38	<3,36
1	27,6	15,5	27,7	21,4	20,2	10,6	34,8	38,5
2	31,3	18,6	22,4	21,4	21,3	10,9	37,8	35,9
3	32,4	17,4	21,4	20,6	20,1	10,1	34,2	43,3
Média	30,43	17,17	23,83	21,13	20,53	10,53	35,60	39,23
% da massa total	15,33	8,65	12,01	10,65	10,35	5,31	17,94	19,77

Tabela 19: Granulometria do fertilizante F3 obtida em cada ensaio, a média [g] e a percentagem retida em cada peneira em relação à massa total [%]

Granulometria	<0,15	0,15	0,297	0,6	1,19	2	2,38	<3,36
1	0	0	0,1	0,5	9,3	15,1	100,6	74,7
2	0	0	0	0,2	9,9	17,1	95,6	78
3	0	0	0	0,3	9,5	18,1	96,1	75,7
Média	0	0	0,03	0,33	9,57	16,77	97,43	76,13
% da massa total	0,00	0,00	0,02	0,17	4,78	8,37	48,65	38,02

Tabela 20: Granulometria do fertilizante T1 obtida em cada ensaio, a média [g] e a percentagem retida em cada peneira em relação à massa total [%]

Granulometria	<0,15	0,15	0,297	0,6	1,19	2	2,38	<3,36
1	0	0	0,8	28,2	66,4	91,7	189,7	121,3
2	0	0	0,3	25	87	81,6	177,9	126,3
3	0	0	0,3	27,6	83,3	87,4	172,3	129,8
Média	0,00	0,00	0,47	26,93	78,90	86,90	179,97	125,80
% da massa total	0,00	0,00	0,09	5,40	15,81	17,42	36,07	25,21

Os resultados do diâmetro médio dos grânulos são apresentados na Tabela 21.

Tabela 21: Diâmetro médio dos grânulos [mm] para os fertilizantes utilizados nos experimentos

	F1	F2	F2	T1
1	1,11	1,44	2,66	2,29
2	0,83	1,42	2,67	2,27
3	0,82	1,48	2,66	2,27
Média	0,92	1,45	2,66	2,27

A Tabela 22 e Tabela 23 apresentam os resultados obtidos na caracterização da densidade aparente, densidade real e o ângulo de talude para cada um dos fertilizantes.

Tabela 22: Densidade Aparente [g.ml⁻¹], Densidade Real [g.ml⁻¹], Ângulo de Talude [°] para os fertilizantes utilizados nos experimentos

	F1			F2			F3		
	Dens. Aparente	Dens. Real	Ângulo de Talude	Dens. Aparente	Dens. Real	Ângulo de Talude	Dens. Aparente	Dens. Real	Ângulo de Talude
1	0,73		57	0,86		42	1,05		36
2	0,73		58	0,87		40	1,03		37
3	0,75		59	0,87		39	1,04		36
Média	0,73	1,80	58	0,87	1,61	40,3	1,04	1,85	36,3

Tabela 23: Densidade Aparente [g.ml⁻¹], Densidade Real [g.ml⁻¹], Ângulo de Talude [°] para o fertilizante utilizado na validação do modelo e testes experimentais.

T1			
	Dens. Aparente	Dens. Real	Ângulo de Talude
1	0,82		36
2	0,82		37
3	0,82		36
Média	0,82	*	36,3

* não definida

5.2 Modelagem matemática do dosador de fertilizante

A Figura 36 ilustra a bancada utilizada para a realização dos ensaios. Os modelos obtidos descrevem o comportamento da taxa de aplicação ao se variar: densidade de fertilizante, *duty cycle* e altura do reservatório.

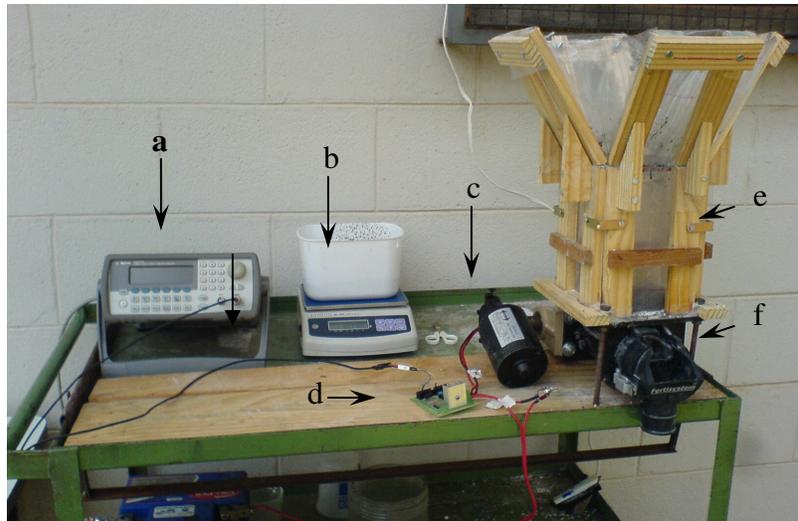


Figura 36: Bancada do ensaio de caracterização do modelo matemático do dosador de fertilizante sendo: (a) gerador de sinais; (b) balança; (c) motor de corrente contínua; (d) circuito de potência; (e) reservatório; (f) dosador de fertilizante.

A Tabela 24 mostra os valores obtidos de taxa de aplicação (em duplicata) em função dos parâmetros descritos acima, além da demanda de potência, obtida por meio da corrente e tensão medidas na experimentação.

Tabela 24: Dados completos obtidos para o modelo matemático do dosador de fertilizante

Ensaio	x1	x2	x3	Dosagem [g]	Tempo [s]	Dosagem [g]	Tempo [s]	Taxa [g.s ⁻¹]	Taxa [g.s ⁻¹]
1	-1,68	0,00	0,00	301,80	15,60	357,80	20,40	19,35	17,54
2	-1,00	-1,00	-1,00	225,60	13,67	250,50	18,20	12,02	10,41
3	-1,00	1,00	-1,00	268,70	7,82	278,60	8,42	26,52	25,84
4	-1,00	-1,00	1,00	242,50	22,46	242,10	15,28	8,07	11,85
5	-1,00	1,00	1,00	250,70	7,32	249,00	6,70	25,87	28,06
6	0,00	-1,68	0,00	278,60	31,64	287,20	34,70	6,87	6,52
7	0,00	1,68	0,00	300,80	6,12	300,40	6,32	39,13	37,88
8	0,00	0,00	-1,68	288,80	9,15	275,40	8,39	24,86	25,55
9	0,00	0,00	1,68	303,10	9,84	306,00	9,53	24,57	25,71
10	0,00	0,00	0,00	287,30	9,32	287,00	9,15	24,25	24,70
11	0,00	0,00	0,00	313,50	9,68	269,60	8,32	26,05	25,07
12	0,00	0,00	0,00	279,20	8,24	270,10	8,26	26,44	25,31
13	0,00	0,00	0,00	277,90	8,10	286,80	8,62	26,74	26,19

14	0,00	0,00	0,00	307,80	9,12	308,80	9,31	27,03	26,62
15	1,00	-1,00	-1,00	302,10	27,14	306,20	24,26	8,87	10,11
16	1,00	1,00	-1,00	331,10	9,32	335,20	10,00	28,95	27,42
17	1,00	-1,00	1,00	306,30	25,09	295,20	23,70	9,76	9,88
18	1,00	1,00	1,00	293,80	8,62	276,60	7,59	26,97	28,41
19	1,68	0,00	0,00	259,30	12,81	296,80	13,32	20,24	22,28

5.2.1 Modelo matemático fatorial

No planejamento fatorial para o modelo linear foi realizada a duplicata dos resultados de taxa de aplicação de fertilizante e para os cálculos do modelo foi utilizado a média das taxas de aplicação obtidas para cada nível. A Tabela 25 mostra os parâmetros utilizados em cada ensaio e os resultados obtidos.

Tabela 25: Resultados do planejamento fatorial 2^3 com ponto central.

Ensaio	x1	x2	x3	Taxa [g.s ⁻¹]	Taxa [g.s ⁻¹]	Taxa Média [g.s ⁻¹]
1	-1,00	-1,00	-1,00	12,02	10,41	11,22
2	-1,00	1,00	-1,00	26,52	25,84	26,18
3	-1,00	-1,00	1,00	8,07	11,85	9,96
4	-1,00	1,00	1,00	25,87	28,06	26,97
5	1,00	-1,00	-1,00	8,87	10,11	9,49
6	1,00	1,00	-1,00	28,95	27,42	28,18
7	1,00	-1,00	1,00	9,76	9,88	9,82
8	1,00	1,00	1,00	26,97	28,41	27,69
9	0,00	0,00	0,00	24,25	24,70	24,47
10	0,00	0,00	0,00	26,05	25,07	25,56
11	0,00	0,00	0,00	26,44	25,31	25,88
12	0,00	0,00	0,00	26,74	26,19	26,47
13	0,00	0,00	0,00	27,03	26,62	26,82

Com os valores estabelecidos na Tabela 25 para os níveis de cada um dos três fatores codificados e definidos os valores da taxa de aplicação se obteve as matrizes X e a matriz y.

Resolvendo a Equação 7, obteve-se:

$$b = \begin{bmatrix} 21,44 \\ 0,11 \\ 8,57 \\ -0,08 \end{bmatrix}$$

Portando, com os valores de b , pode-se obter o modelo matemático empírico codificado

$$\hat{y}(x_1, x_2, x_3) = 21,44 + 0,11 \times x_1 + 8,57 \times x_2 - 0,08 \times x_3 \quad \dots (18)$$

Onde:

x_1, x_2, x_3 são os fatores codificados;

y é a taxa de aplicação [g.s^{-1}].

O modelo decodificado, isto é, o equacionamento que utiliza os parâmetros físicos na modelagem é definido por meio da equação 8, substituindo os valores no modelo acima.

$$\hat{y}(d, dc, h) = 0,437 + 0,687 \times d + 0,428 \times dc - 0,008 \times h \quad \dots (19)$$

Onde:

d é a densidade aparente do fertilizante [g.ml^{-1}];

dc é o *duty cycle* do PWM [%];

h é a altura do nível de fertilizante no reservatório [m];

y é a taxa de aplicação [g.s^{-1}].

A avaliação estatística da regressão realizada para a obtenção do modelo multifatorial linear é apresentada na Tabela 26.

Tabela 26: Análise de variância para o ajuste, pelo método de mínimos quadrados, do modelo linear.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	N. de G. de liber.	Média Quadrática
Regressão	587,26	p-1	3,00
Resíduos	164,56	n-p	22,00
Falta de ajuste	161,26	m-p	5,00
Erro puro	3,30	n-m	17,00
Total	751,82	n-1	3,00
% de variação explicada		78,111	
% máxima de variação explicável		99,561	

O coeficiente de determinação do modelo ficou em torno de 78,11% e o teste F foi válido (Tabela 27), pode-se afirmar que o modelo (Equação 18) é realmente preditivo para as condições do processo estudadas.

Tabela 27: Teste F de determinação da significância e falta de ajuste do modelo

	F calculado	F Tabelado	Resultado
Significância	26,17	3,05	Significativo
Falta de ajuste	165,98	2,81	Ajustado

Assim, foram geradas a superfície de resposta e as curvas em nível para os parâmetros do modelo matemático do dosador de fertilizante, como mostrado na Figura 37.

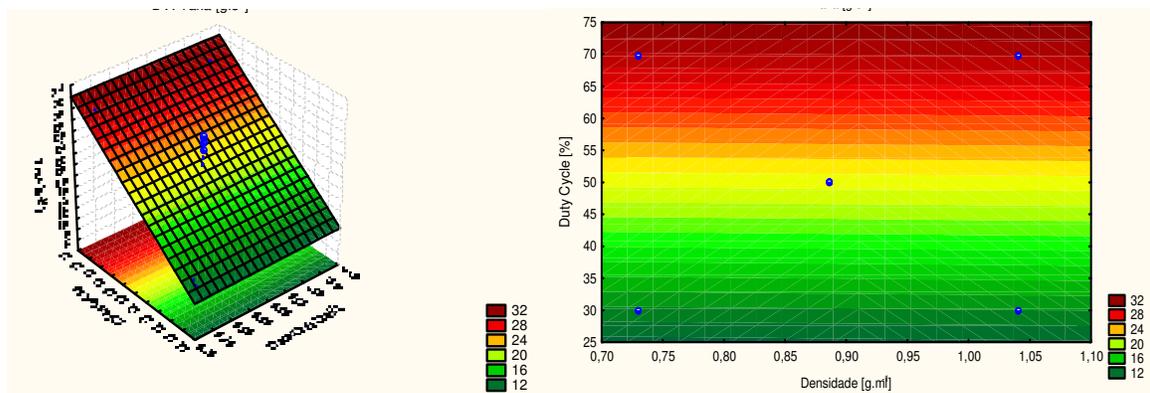


Figura 37: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros do modelo matemático linear do dosador de fertilizante

5.2.2 Modelo matemático central composto - linear

O planejamento fatorial, com os níveis rotacionados, para o modelo linear foi realizado com os resultados obtidos de taxa de aplicação em duplicata. Os cálculos do modelo utilizaram a média das taxas de aplicação obtidas para cada nível como valor da variável dependente. A Tabela 28 mostra os resultados do planejamento central composto.

Tabela 28: Resultados do planejamento central composto - linear.

Ensaio	x1	x2	x3	Taxa [g.s ⁻¹]	Taxa [g.s ⁻¹]	Taxa Média [g.s ⁻¹]
1	-1,00	-1,00	-1,00	12,02	10,41	11,22
2	-1,00	1,00	-1,00	26,52	25,84	26,18
3	-1,00	-1,00	1,00	8,07	11,85	9,96
4	-1,00	1,00	1,00	25,87	28,06	26,97
5	1,00	-1,00	-1,00	8,87	10,11	9,49
6	1,00	1,00	-1,00	28,95	27,42	28,18
7	1,00	-1,00	1,00	9,76	9,88	9,82
8	1,00	1,00	1,00	26,97	28,41	27,69
9	-1,68	0,00	0,00	19,35	17,54	18,44
10	1,68	0,00	0,00	20,24	22,28	21,26
11	0,00	-1,68	0,00	6,87	6,52	6,69
12	0,00	1,68	0,00	39,13	37,88	38,51
13	0,00	0,00	-1,68	24,86	25,55	25,21

14	0,00	0,00	1,68	24,57	25,71	25,14
15	0,00	0,00	0,00	24,25	24,70	24,47
16	0,00	0,00	0,00	26,05	25,07	25,56
17	0,00	0,00	0,00	26,44	25,31	25,88
18	0,00	0,00	0,00	26,74	26,19	26,47
19	0,00	0,00	0,00	27,03	26,62	26,82

A matriz X e y são definidas com os valores da Tabela 28 dos valores codificados e da taxa de aplicação média (como descrito no item 4.4.2.1.2). Com os valores das matrizes X e y definidos e utilizando a Equação 7, pode-se obter os valores dos coeficientes do modelo :

$$b = \begin{bmatrix} 21,74 \\ 0,41 \\ 8,94 \\ -0,05 \end{bmatrix}$$

Com isso, o modelo matemático empírico codificado é dado por:

$$\hat{y}(x_1, x_2, x_3) = 21,74 + 0,41 \times x_1 + 8,94 \times x_2 - 0,05 \times x_3 \quad \dots (20)$$

Onde:

x_1, x_2, x_3 são os fatores codificados;

y é a taxa de aplicação [g.s^{-1}].

O modelo decodificado é apresentado na equação abaixo:

$$\hat{y}(d, dc, h) = -3,051 + 2,645 \times d + 0,447 \times dc - 0,05 \times h \quad \dots (21)$$

Onde:

d é a densidade aparente do fertilizante [g.ml^{-1}];

dc é o *duty cycle* do PWM [%];

h é a altura do nível de fertilizante no reservatório [m];
 y é a taxa de aplicação [g.s⁻¹].

A Tabela 29 mostra os resultados obtidos na análise realizada da regressão para o modelo central composto – linear.

Tabela 29: Análise de variância para o ajuste, pelo método de mínimos quadrados, para o modelo central composto - linear.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	N. de G. de liber.	Média Quadrática
Regressão	1092,88	p-1	3,00
Resíduos	202,30	n-p	34,00
Falta de ajuste	202,30	m-p	11,00
Erro puro	1,32	n-m	23,00
Total	1295,18	n-1	3,00
% de variação explicada		84,380	
% máxima de variação explicável		99,898	

O coeficiente de determinação deste modelo ficou em 84,38% e o teste F foi válido (Tabela 30), pode-se afirmar que o modelo (Equação 20) é realmente preditivo para as condições do processo estudadas.

Tabela 30: Teste F de determinação da significância e falta de ajuste do modelo

	F calculado	F Tabelado	Resultado
Significância	61,22	3,01	Significativo
Falta de ajuste	321,06	2,23	Ajustado

Assim, foram geradas a superfície de resposta e as curvas em nível para os parâmetros do modelo matemático do dosador de fertilizante, como mostrado na Figura 38.

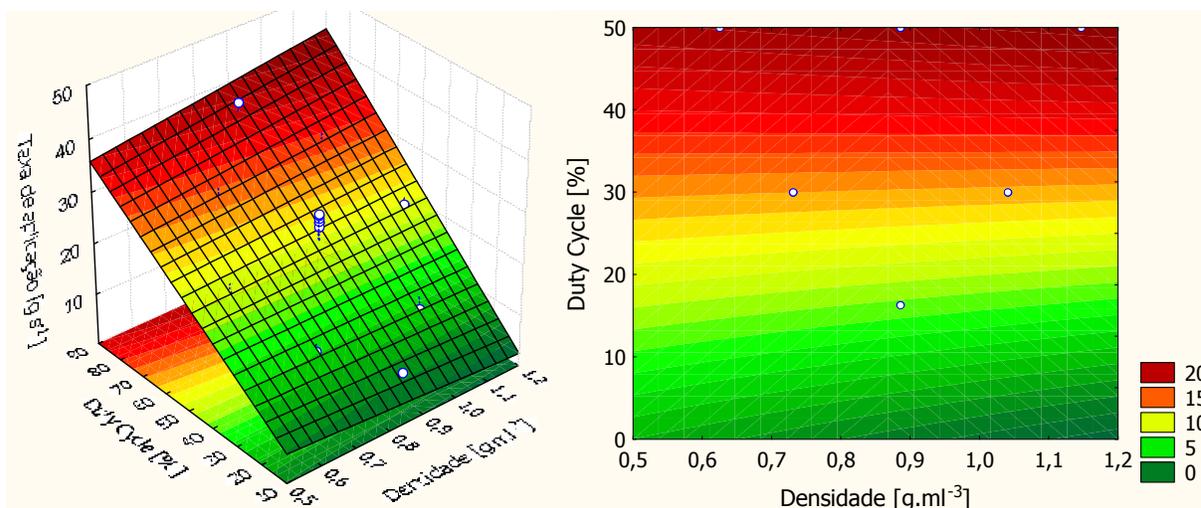


Figura 38: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros da modelo matemático linear com todos os níveis do dosador de fertilizante.

5.2.3 Modelo matemático central composto - quadrático

A Tabela 31 apresenta os parâmetros utilizados no planejamento central composto – quadrático.

Tabela 31: Resultados do planejamento central composto 2^3 , modelo quadrático

Ensaio	x1	x2	x3	x1 ²	x2 ²	x3 ²	x1.x2	x1.x3	x2.x3	Taxa [g.s ⁻¹]	Taxa [g.s ⁻¹]	Taxa Média [g.s ⁻¹]
1	-1,00	-1,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	12,02	10,41	11,22
2	-1,00	1,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	-1,00	1,00	-1,00	26,52	25,84	26,18
3	-1,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-1,00	-1,00	8,07	11,85	9,96
4	-1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-1,00	-1,00	1,00	25,87	28,06	26,97
5	1,00	-1,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	-1,00	-1,00	1,00	8,87	10,11	9,49
6	1,00	1,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-1,00	-1,00	28,95	27,42	28,18
7	1,00	-1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	-1,00	1,00	-1,00	9,76	9,88	9,82
8	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	26,97	28,41	27,69
9	-1,68	0,00	0,00	2,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	19,35	17,54	18,44
10	1,68	0,00	0,00	2,83	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	20,24	22,28	21,26
11	0,00	-1,68	0,00	0,00	2,83	0,00	0,00	0,00	0,00	6,87	6,52	6,69
12	0,00	1,68	0,00	0,00	2,83	0,00	0,00	0,00	0,00	39,13	37,88	38,51
13	0,00	0,00	-1,68	0,00	0,00	2,83	0,00	0,00	0,00	24,86	25,55	25,21

14	0,00	0,00	1,68	0,00	0,00	2,83	0,00	0,00	0,00	24,57	25,71	25,14
15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	24,25	24,70	24,47
16	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,05	25,07	25,56
17	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,44	25,31	25,88
18	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	26,74	26,19	26,47
19	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	27,03	26,62	26,82

Com os valores, estabelecidos na Tabela 31, para os níveis de cada um dos três fatores codificados obtém-se a matrizes X . A matriz y é definida com os valores da taxa de aplicação média.

Os valores dos coeficientes do modelo são obtidos com o uso da Equação 7. Assim, tem-se:

$$b = \begin{bmatrix} 25,98 \\ 0,41 \\ 8,93 \\ -0,05 \\ -2,90 \\ -1,92 \\ 1,01 \\ 0,57 \\ 0,04 \\ 0,15 \end{bmatrix}$$

Portando, com os valores de b , pode-se obter o modelo matemático empírico codificado.

$$\hat{y}(x_1, x_2, x_3) = 25,98 + 0,41 X_1 + 8,93 X_2 - 0,05 X_3 - 2,90 X_1^2 + 1,92 X_2^2 + 1,01 X_3^2 + 0,57 X_1 X_2 + 0,04 X_1 X_3 + 0,15 X_2 X_3 \dots (22)$$

Onde:

x_1, x_2, x_3 são os fatores codificados;

y é a taxa de aplicação [$\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$].

O modelo decodificado é apresentado na equação abaixo:

$$\hat{y}(d, dc, h) = -99,70 + 206,26d - 0,75dc + 0,03h - 120,54d^2 - 0,005dc^2 + 0,034h^2 + 0,185d \times dc + 0,002d \times h + 0,0dc \times h$$

... (23)

Onde:

d é a densidade aparente do fertilizante [$\text{g}\cdot\text{ml}^{-1}$];

dc é o *duty cycle* do PWM [%];

h é a altura do nível de fertilizante no reservatório [m];

y é a taxa de aplicação [$\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$].

A Tabela 32 mostra os resultados obtidos na análise de variância realizada.

Tabela 32: Análise de variância para o ajuste, pelo método de mínimos quadrados, para o modelo quadrático.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	N. de G. de liber.	Média Quadrática
Regressão	1.240	p-1	9,00
Resíduos	51,4	n-p	28,00
Falta de ajuste	48,1	m-p	5,00
Erro puro	3,30	n-m	23,00
Total	1.342,8	n-1	37,00
% de variação explicada		96,034	
% máxima de variação explicável		99,898	

O coeficiente de determinação deste modelo ficou em 96,03% e o teste F foi válido (Tabela 33), pode-se afirmar que o modelo (Equação 22) é realmente preditivo para as condições do processo estudadas.

Tabela 33: Teste F de determinação da significância e falta de ajuste do modelo

	F calculado	F Tabelado	Resultado
Significância	74,88	2,24	Significativo
Falta de ajuste	68,71	2,64	Ajustado

Assim, foram geradas a superfície de resposta e as curvas em nível para os parâmetros do modelo matemático do dosador de fertilizante, como mostrado na Figura 39.

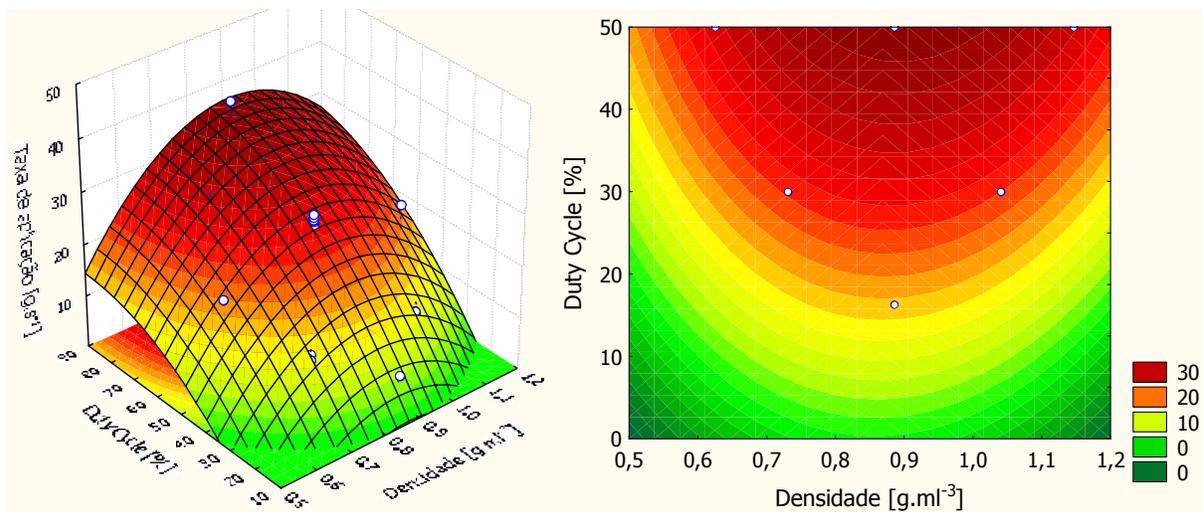


Figura 39: Superfície de resposta e curvas em nível para os parâmetros da modelo matemático quadrático.

5.2.4 Definição do modelo utilizado

O modelo utilizado no programa de controle foi o modelo linear obtido por meio do planejamento multivariado central composto. Apesar do modelo quadrático apresentar maior percentagem de variação explicada, de aproximadamente 96 % contra 85 %, este apresenta uma grande dificuldade de implementação no microcontrolador e um maior esforço de

processamento do mesmo. Estes motivos tornaram o sistema lento e com falhas na execução do programa. Em virtude dos motivos listados optou-se pelo modelo linear.

5.3 Sistema de aquisição de dados

5.3.1 Programa de aquisição

O programa para a aquisição dos dados foi desenvolvido em *LabView 7.1*, o painel frontal (Figura 40) gera em tempo real o gráfico do tempo pela tensão de saída da célula de carga. O sistema de aquisição operou com uma taxa de aquisição de 250 medições por segundo, como destacado na Figura 41 (d).

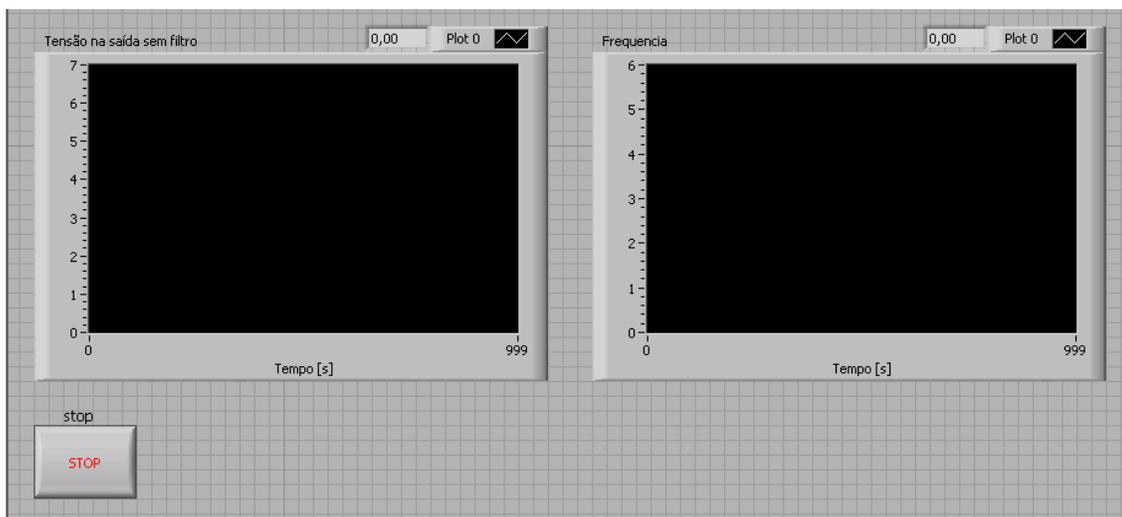


Figura 40: Painel frontal do sistema de aquisição de dados

O programa é constituído por três partes. A primeira é referente à aquisição dos dados provenientes da célula de carga (Figura 41a). A segunda parte se refere à aquisição dos dados do gerador de sinal que simula a velocidade de deslocamento do equipamento (Figura 41b). A última parte do programa realiza a abertura de um documento, no qual os dados coletados são gravados em um arquivo tipo texto, conforme observado na Figura 41c.

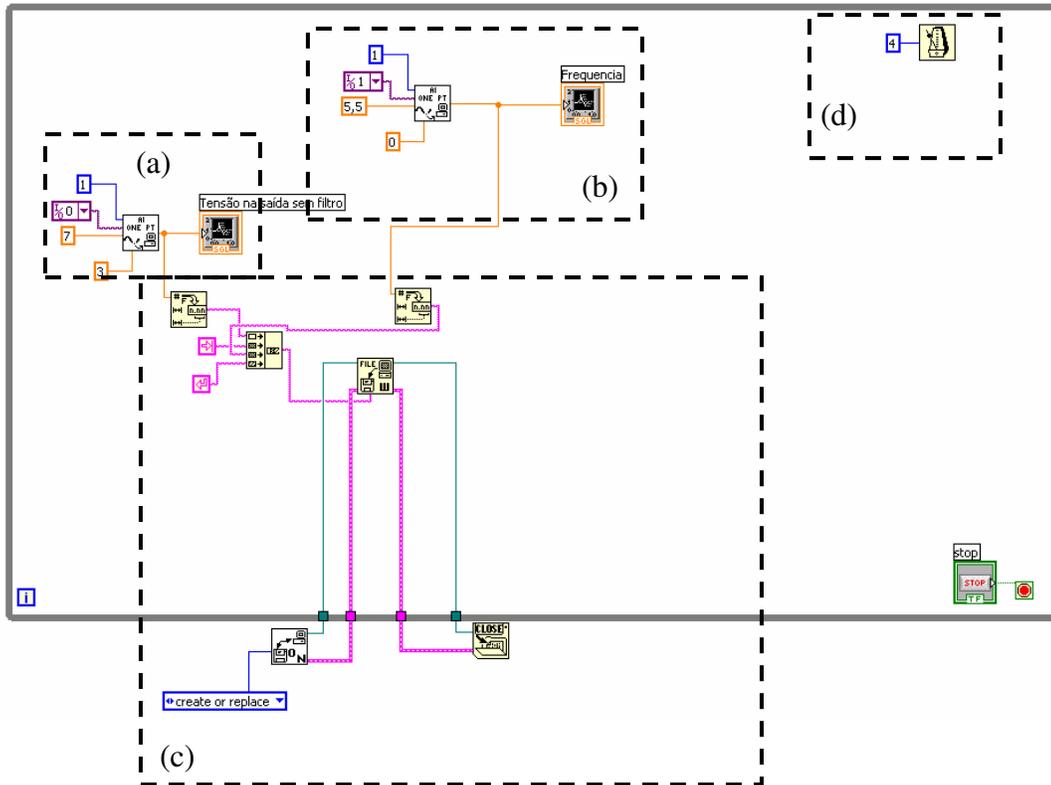


Figura 41: Diagrama funcional do sistema (a) sistema de aquisição da célula de carga; (b) sistema de aquisição da frequência do sinal simulação da velocidade; (c) sistema de gravação dos dados; (d) taxa de aquisição de dados em ms.

5.3.2 Sistema físico de aquisição

A construção do sistema físico de aquisição é apresentado na Figura 42. O anteparo, construído em acrílico, foi fixado na extremidade da célula de carga e nas suas laterais foram colocadas proteções para evitar perda de fertilizante nos testes. Foi necessária a proteção da célula de carga com uma película de revestimento devido à abrasividade do fertilizante que pode danificar o equipamento.



Figura 42: Sistema físico de aquisição: (a) Vista lateral da célula de carga com anteparo; (b) visão em perspectiva

5.3.3 Calibração

Os resultados da calibração da célula de carga são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34: Resultado dos testes de calibração da célula de carga, sinal de saída da célula de carga [V] e fluxo de massa [$\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$].

Fluxo	31,781	30,106	29,084	26,393	25,088	22,700	20,903	18,497	15,960	13,437	10,837	7,909	5,259
Saída	0,821	0,782	0,785	0,745	0,768	0,756	0,725	0,709	0,635	0,602	0,580	0,522	0,411

Com os valores apresentados na Tabela acima construiu-se um gráfico da curva de calibração, isto é, a tensão média obtida em função da taxa de aplicação média [$\text{g}\cdot\text{s}^{-1}$].

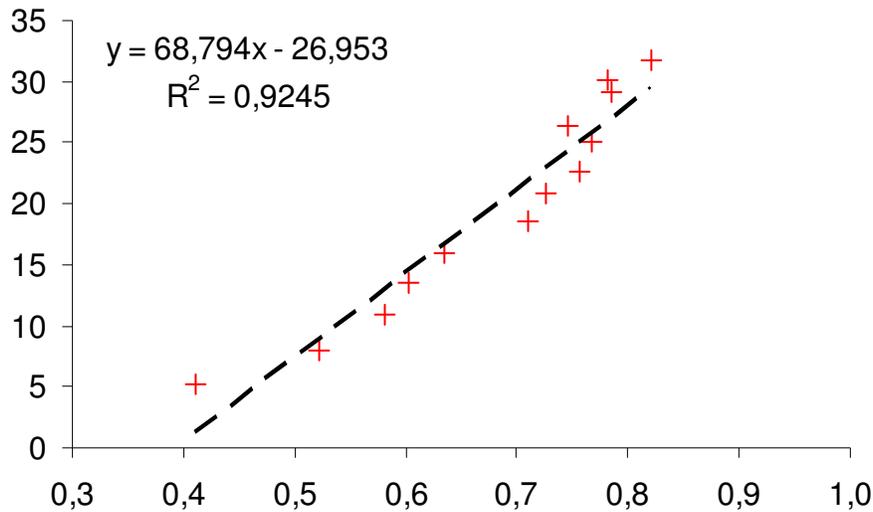


Figura 43: Gráfico da curva de calibração da célula de carga utilizada e equação da regressão

5.4 Protótipo do sistema de controle

Este item foi dividido em duas partes, a primeira tem como resultado o programa desenvolvido e a segunda parte a avaliação do sistema como um todo.

5.4.1 Programa de controle do sistema de dosagem

O aplicativo desenvolvido possui uma interface homem máquina com menu de opções auto-explicativo no *display*. O monitor apresenta, de forma clara, qual o parâmetro deve se inserido e sua unidade. O teclado possui as teclas de 0 à 9 para a digitação dos valores e botões de *enter* e corrigir. Além disso, foi adicionado um botão de emergência para que o processo seja interrompido pelo usuário em qualquer momento. Após o início da operação no *display* se exibe a velocidade de deslocamento do equipamento. Foi criada uma biblioteca com quatro tipos de fertilizantes para que o operador selecione.

O programa é capaz de contar pulsos, com uma frequência que varia de 0 à 100 Hz. O modelo foi elaborado para uma velocidade de operação entre 0 à 2,5 m.s⁻¹, isto representa, uma resolução de 0,033 m.s⁻¹. O contador foi projetado para taxa de atualização de um segundo. Para isso foi configurado *TIMER 1* e inserido *debounce* no processo de interrupção.

O sinal de saída PWM foi configurado, utilizando a equação 13, para um período de 1.024 ms (~1 kHz de frequência). A atualização do *duty cycle* ocorre todo vez que há o retorno da interrupção do *TIMER 1*, isto é, atualização a cada segundo.

5.4.2 Avaliação do protótipo

5.4.2.1 Ensaio preliminar

Durante a realização do teste preliminar observou-se que o sinal de saída (PWM) apresenta uma componente de alta frequência que pode influenciar no funcionamento do sistema de controle. Com o intuito de reduzir tal sinal alta frequência se dimensionou um filtro do tipo passa-baixa, conforme ilustra o esquema da Figura 44.

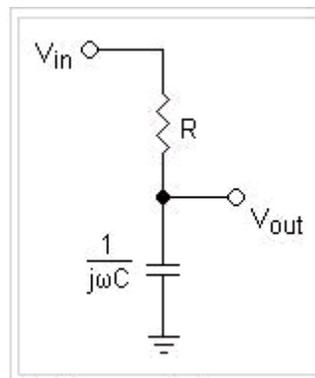


Figura 44: Esquema do filtro de passa-baixa utilizado no sinal de saída do microcontrolador

Para o cálculo dos valores do resistor e do capacitor para o filtro de passa-baixa utilizou-se a seguinte equação:

$$f_c = \frac{1}{2 \times \pi \times R \times C} \quad \dots (24)$$

Onde:

R é o valor da resistência [Ω];

C é o valor da capacitância [F];

f_c é o valor da frequência de corte [Hz].

Como resultado foi implementado um filtro com resistência de 1 k Ω e capacitância de 22 nF para uma frequência de corte de 10 kHz. A Figura 45 ilustra o resultado obtido da implementação do filtro de passa-baixa.

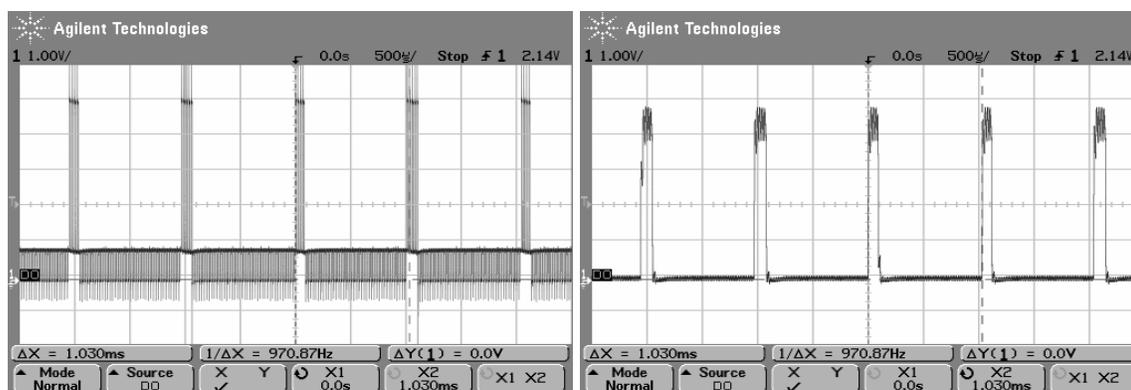


Figura 45: Sinal PWM de saída do microcontrolador (a) sem filtro; (b) com filtro

Após a implementação do filtro foi realizado o ensaio para a verificação do sinal PWM de saída gerado pelo microcontrolador. Neste teste foi comparado o valor do *duty cycle* calculado por meio da equação 20 implementada no programa e o valor obtido na saída do microcontrolador. A Tabela 35 mostra os resultados obtidos no teste preliminar além dos parâmetros utilizados e a variação entre os valores obtidos experimentalmente e os valores teóricos.

Tabela 35: Resultado do ensaio preliminar, verificação do sinal gerado pelo microcontrolador.

Variáveis				Duty Cycle [%]		
Densidade [g.ml ⁻¹]	Distância - linhas [m]	Taxa [kg.ha ⁻¹]	Velocidade [m.s ⁻¹]	Teórico	Real	Variação
1,04	0,5	150	2	42,45	41,80	0,65
1,15	0,5	100	2	31,92	30,86	1,06
1,04	1,0	50	2	31,26	32,03	-0,77
1,04	1,0	100	2	53,64	53,13	0,51
1,04	1,0	200	2	98,38	98,44	-0,06
1,15	0,5	100	1	20,73	19,14	1,59

Com estes resultados pode-se observar que o sinal de saída se mostrou adequado ao sinal esperado. Com isso, pode-se prosseguir com os testes para verificação do sistema de controle operando em conjunto com o dosador de fertilizante.

5.4.2.2 Teste Estático

Antes da realização do teste estático foi realizada uma simulação do teste para verificar o desvio médio relativo do *duty cycle* para verificar o erro esperado que o sistema pode apresentar em operação. A Tabela 36 mostra os resultados obtidos neste ensaio.

Tabela 36: Resultado do desvio médio relativo (DRM) do *duty cycle* no sinal de saída para 50, 100 e 200 kg.ha⁻¹ de taxa de aplicação configurada pelo usuário, em função da velocidade (Vel.)

Vel. [m.s ⁻¹]	50 [kg.ha ⁻¹]			100 [kg.ha ⁻¹]			200 [kg.ha ⁻¹]		
	Esperado [%]	Real [%]	DRM [%]	Esperado [%]	Real [%]	DRM [%]	Esperado [%]	Real [%]	DRM [%]
0,50	10,39	9,73	6,33	13,18	13,23	0,34	18,77	18,48	1,58
1,00	13,18	12,84	2,61	18,77	18,29	2,59	29,96	29,77	0,64
1,50	15,98	15,95	0,19	24,37	24,12	1,02	41,14	40,47	1,64
2,00	18,78	18,68	0,52	29,96	29,57	1,31	52,33	51,55	1,49

Nas Tabelas Tabela 37, Tabela 38 e na Tabela 39 podem ser observados os resultados obtidos no teste estático para aplicações de fertilizante de 50, 100 e 200 kg.ha⁻¹, respectivamente. Também são apresentados os valores da média dos testes para cada velocidade e seu desvio padrão além do valor do desvio médio relativo (DRM). Neste teste foram efetuados três repetições para cada nível de velocidade e determinada taxa de aplicação configurada inicialmente.

Tabela 37: Resultados do DRM para uma taxa de 50 kg.ha⁻¹. Onde *m*, *t* e *Taxa* são a massa [g], o tempo [s] e a taxa de aplicação [kg.ha⁻¹] obtidos em cada teste respectivamente

Vel.	Teste 1			Teste 2			Teste 3			Média	Desvio	T _i	T _o	DRM
	<i>m</i>	<i>t</i>	Taxa	<i>m</i>	<i>t</i>	Taxa	<i>m</i>	<i>t</i>	Taxa					
0,5	188,19	111,45	1,14	166,55	93,52	1,13	210,21	108,67	1,15	1,14	0,01	45,62	50,00	9,61
1,0	202,08	63,10	2,23	207,80	64,91	2,26	258,05	77,44	2,23	2,24	0,02	44,87	50,00	11,43
1,5	192,53	38,14	3,45	191,53	38,30	3,41	246,55	46,20	3,49	3,45	0,04	46,00	50,00	8,69
2,0	214,24	34,20	4,48	214,24	34,36	4,46	292,64	45,92	4,52	4,49	0,03	44,87	50,00	11,44

Tabela 38: Resultados do DRM para uma taxa de 100 kg.ha⁻¹. Onde *m*, *t* e *Taxa* são a massa [g], o tempo [s] e a taxa de aplicação [kg.ha⁻¹] obtidos em cada teste, respectivamente

Vel.	Teste 1			Teste 2			Teste 3			Média	Desvio	T _i	T _o	DRM
	<i>m</i>	<i>t</i>	Taxa	<i>m</i>	<i>t</i>	Taxa	<i>M</i>	<i>t</i>	Taxa					
0,5	188,07	55,27	2,30	173,47	47,27	2,38	216,80	54,50	2,42	2,36	0,06	94,60	100,00	5,71
1,0	211,14	30,21	4,97	223,33	33,46	4,86	302,15	44,62	4,86	4,90	0,06	97,90	100,00	2,14
1,5	213,68	20,16	7,57	206,93	18,91	7,73	308,62	29,04	7,70	7,66	0,08	102,17	100,00	2,12
2,0	208,33	15,09	9,75	205,87	13,69	10,59	252,63	16,93	9,89	10,08	0,45	100,80	100,00	0,80

Tabela 39: Resultados do DRM para uma taxa de 200 kg.ha⁻¹. Onde *m*, *t* e *Taxa* são a massa [g], o tempo [s] e a taxa de aplicação [kg.ha⁻¹] obtidos em cada teste, respectivamente

Vel.	Teste 1			Teste 2			Teste 3			Média	Desvio	T _i	T _o	DRM
	<i>m</i>	<i>t</i>	Taxa	<i>m</i>	<i>t</i>	Taxa	<i>m</i>	<i>t</i>	Taxa					
0,5	179,91	24,32	4,88	173,99	23,05	4,91	221,74	26,98	5,06	4,95	0,10	198,07	200,00	0,97
1,0	183,08	11,83	10,31	195,84	12,15	11,11	237,52	14,04	10,85	10,76	0,41	215,15	200,00	7,04
1,5	198,86	8,92	15,44	213,44	9,45	16,15	245,27	9,96	16,08	15,89	0,39	211,84	200,00	5,59
2,0	205,53	6,91	20,90	207,24	7,18	20,39	252,13	7,98	20,93	20,74	0,30	207,37	200,00	3,56

Ao se observar as tabelas acima pode-se notar que para a taxa de aplicação de 50 kg.s⁻¹ o desvio média foi 10 %. Isso é esperado, pois na simulação previamente realizada se observou DRM mais elevados. O sistema apresentou melhor ajuste quando opera com 100 kg.s⁻¹ com o desvio variando de 0,8 à 5,71 %. Na média de todas as observações o valor de DRM foi de 5,75 %.

A Figura 46 mostra os resultados obtidos nos ensaios de maneira gráfica. Pode-se observar os valores obtidos experimentalmente (símbolo +) e o valor desejado (linha tracejada).

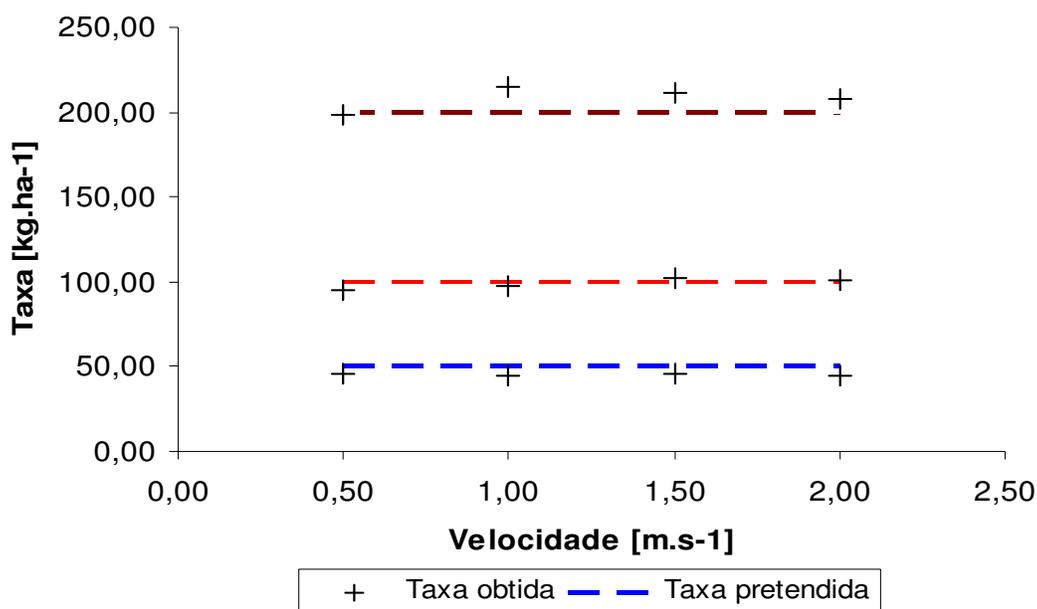


Figura 46: Gráfico da taxa de aplicação de fertilizante [$\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}$] real e a taxa configurada pelo usuário

Os valores do DMR são apresentados na Figura 47, nela pode-se observar que quando o controlador é configurado para a taxa de aplicação de $50 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ há um maior desvio em relação ao à taxa selecionada pelo usuário. Já para os demais valores de taxa de aplicação o desvio se manteve estável, variando de 0,8 à 7 %.

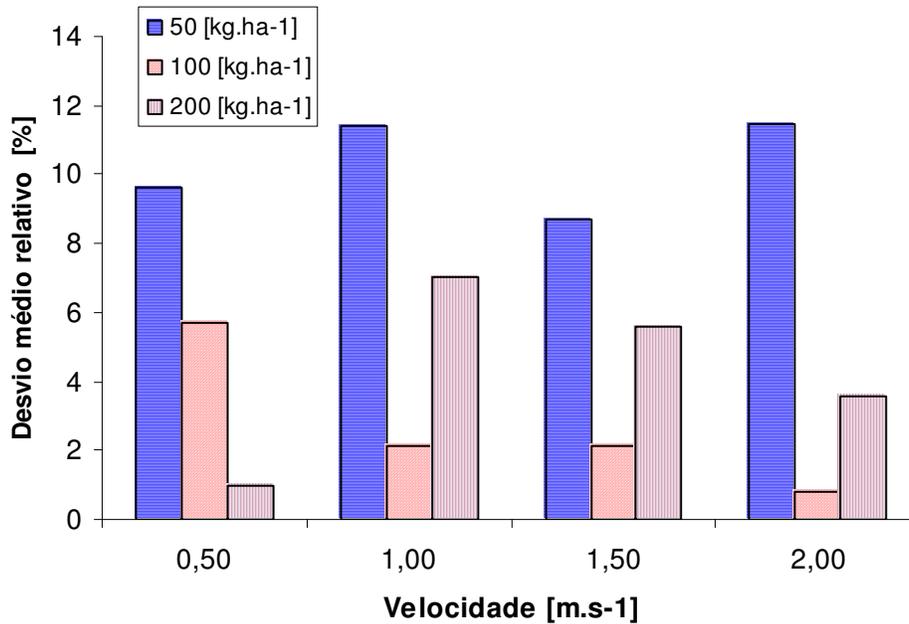


Figura 47: Gráfico da variação do Desvio Médio Relativo em função da velocidade de deslocamento do equipamento

5.4.2.3 Teste dinâmico

Os resultados do teste dinâmico são apresentados a seguir.

Na Figura 48 pode-se observar o comportamento do sistema de controle em função da excitação realizada por um sinal do tipo pulso. O gráfico ilustra o sinal de saída da célula de carga e a velocidade de deslocamento simulada em função do tempo. A linha contínua representa o valor de tensão de saída da célula processado por um filtro de média com 25 pontos.

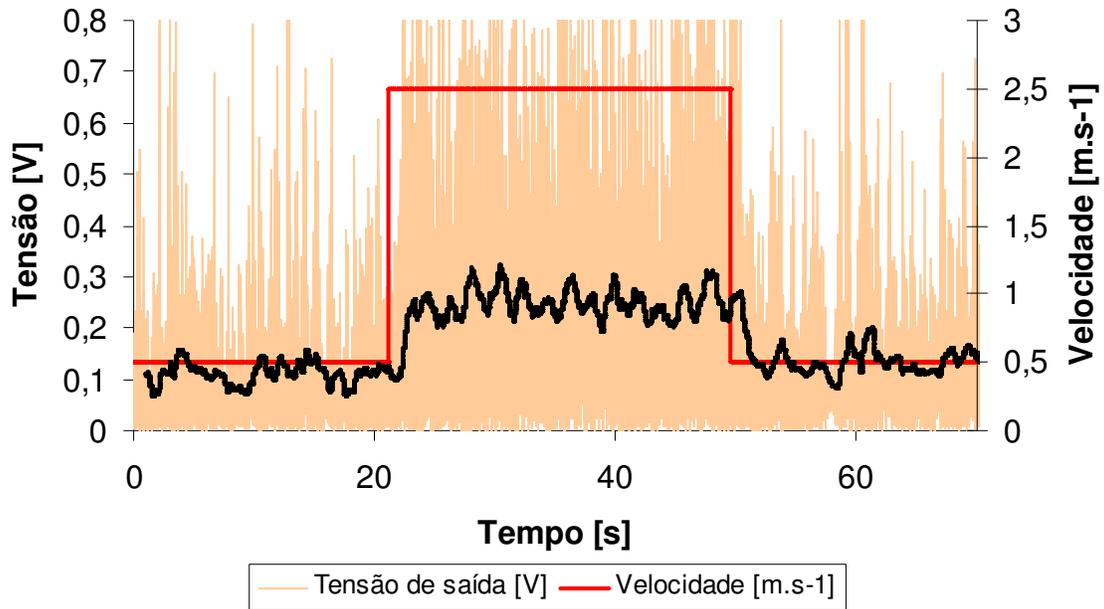


Figura 48: Excitação do tipo pulso, valores de velocidade [m.s⁻¹] e tensão de saída [V].

O gráfico da Figura 49 mostra, em detalhe para a subida, a resposta do sistema em função de uma excitação do tipo degrau. No gráfico pode-se observar a linha de tensão média obtida após o degrau e o tempo de subida (t_s), que é o tempo que o sinal de tensão da célula de carga passa pela primeira vez pelo sinal de tensão médio, isto é, o passa pelo ponto de acomodação do sistema. O valor de t_s calculado foi de 1,32 s.

Outro parâmetro importante que pôde ser calculado foi o tempo de atraso que representa o valor em que o sinal de saída atinge 50 % do valor médio de saída. O valor do tempo de atraso foi de 0,72 s.

Com isso, pôde observar que o sistema de controle é capaz de atuar de maneira adequada para oscilações de velocidade de 0,5 à 2,5 m.s⁻¹, contanto que esta variação ocorra em um tempo superior ao tempo de subida, no caso 1,32 s, ou ainda o sistema pode operar com uma aceleração do equipamento 1,51 m.s⁻².

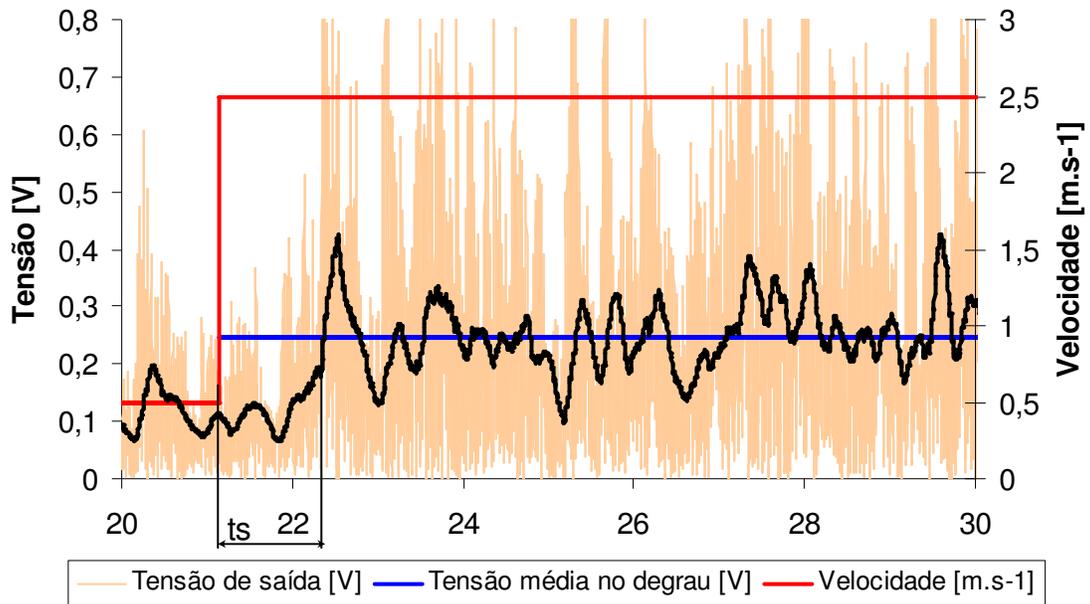


Figura 49: Excitação do tipo degrau de subida, valores tensão [V] e velocidade [m.s⁻¹].

O gráfico da Figura 50 mostra, em detalhe para a descida, a resposta do sistema em função de uma excitação do tipo degrau. No gráfico pode-se observar a linha de tensão média obtida após o degrau. O tempo de descida (t_d) foi de 0,97 s e o valor o tempo de atraso foi de 0,35s.

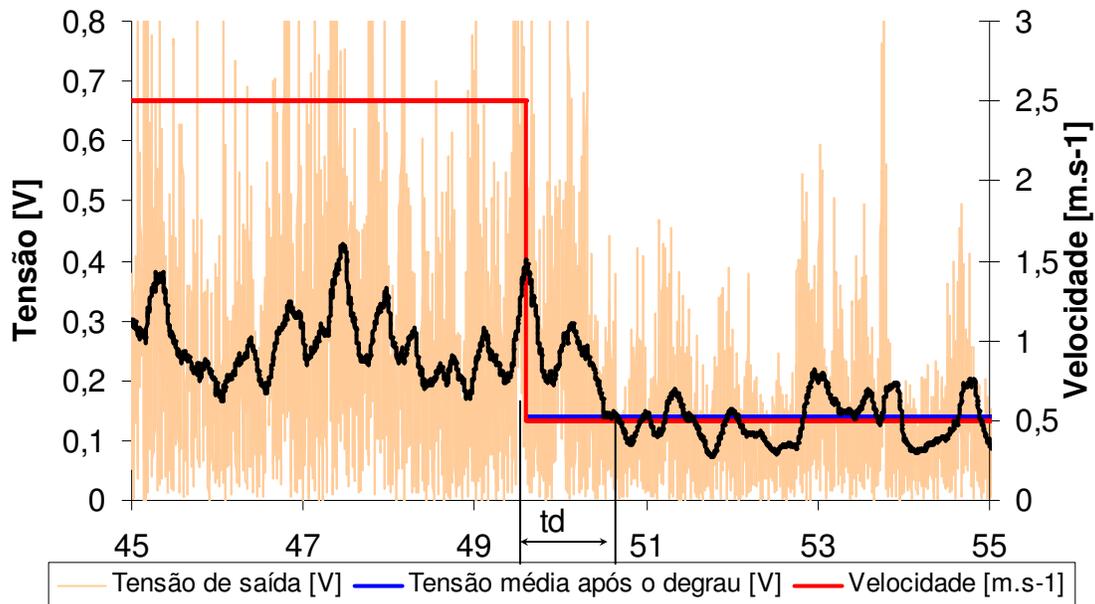


Figura 50: Excitação do tipo degrau de descida, valores de velocidade [m.s⁻¹] e tensão de saída da célula de carga [g.s⁻¹].

Ao se observar os gráficos na Figura 49 e Figura 50 pode-se verificar que o equipamento respondeu de forma adequada ao sinal de excitação, isto é, o sistema de controle atua de forma rápida às possíveis variações bruscas de velocidade. Além disso, se observou que o tempo de descida foi inferior ao tempo de subida, pois na subida o motor deve vencer a inércia do sistema, já na descida o sistema mecânico o ajuda a desacelerar mais rapidamente.

5.5 Custo dos equipamentos

O custo de produção do protótipo foi estimado com os valores obtidos na cidade de Campinas. No valor de cada equipamento estão inclusas as despesas de envio para o Laboratório de Instrumentação e Controle - LIC. O resultado do levantamento dos custos de produção do protótipo é apresentado na Tabela 40 e a levantamento completo de componente no Apêndice A.

Tabela 40: Custo de produção do protótipo

Componente	Valor R\$	% do valor
Motor acionamento	228,00	18,40
Circuito de Potência	44,45	3,58
Bateria	260,00	20,99
Kit Microcontrolador	700,00	56,50
Cabos e conectores	6,40	0,52
TOTAL (R\$)	1238,85	100,00

O gráfico da Figura 51 mostra a participação de cada parte do sistema de controle proposto em função do custo total.

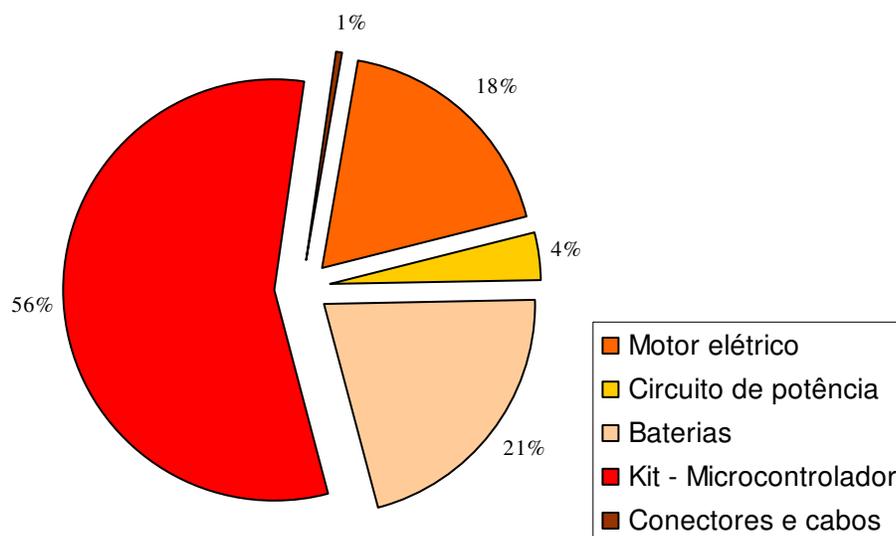


Figura 51: Gráfico da participação no custo de cada parte do sistema de controle

Ao se observar a composição do custo do protótipo pode-se notar que grande parte do custo é devido ao Kit-Microcontrolador. Contudo, num produto em escala comercial há a possibilidade de implementação de uma solução mais econômica, isto é, pode-se optar por um conjunto de microcontrolador e seus componentes (teclado e LCD) projetados para que operem de forma dedicada, com isso reduzindo os custos. Além disso, o motor elétrico e as baterias podem ser adquiridos com um menor preço quando comprados em escala.

6 CONCLUSÕES

O protótipo desenvolvido mostrou-se um equipamento robusto e de fácil operação. Durante os ensaios não apresentou falhas e é de fácil regulagem dos parâmetros, dispensando a utilização de ferramentas para montagem e operação do equipamento como acontece com sistemas mecânicos.

A metodologia para obtenção do modelo do mecanismo dosador mostrou-se adequada, pois nos testes iniciais, o valor do sinal de saída do microcontrolador se mostrou ajustado em relação ao sinal (taxa de aplicação de fertilizante) de entrada (velocidade de deslocamento do equipamento) e as variáveis configuradas pelo operador.

O aplicativo computacional desenvolvido conseguiu, de forma adequada, controlar o mecanismo de dosagem de fertilizante, conforme se pôde observar nos ensaios realizados:

No teste estático verificou-se que a melhor faixa de operação para o mecanismo é quando a taxa de aplicação está configurada para 100 kg.ha^{-1} .

O desvio médio relativo determinado nos ensaios foi inferior ao observado pela literatura, o valor do DRM ficou em média de 5,75 %. Com isso pode-se concluir que a metodologia utilizada se mostrou adequada às necessidades da aplicação.

O tempo de resposta do equipamento se mostrou adequado, pois o tempo de subida, que é maior que o tempo de descida foi de 1,32 e 0,97 s respectivamente. O sistema de controle mostrou-se adequado, já que possui a capacidade de adequar a taxa de aplicação em função da velocidade de deslocamento do equipamento.

O protótipo desenvolvido em um sistema microcontrolado apresentou baixo custo de construção. Há uma grande margem para a redução do custo ao se utilizar partes específicas para o projeto.

7 BIBLIOGRAFIA

AGILENT, Agilent Technologies. **Catálogo Técnico**. 2006. Disponível em: <<http://www.agilent.com>>. Acessado em 24/03/2006

AGRIMAQ, AGRIMAQ Tecnologia Agrícola Ltda. **Catálogo Técnico**. 2005. Disponível em: <<http://www.fertisystem.com.br>>. Acessado em 01/10/2005

ASAE, American Society of Agricultural Engineers. Procedure for measuring distribution uniformity and calibrating granular broadcast spreaders. **S341.2**. St. Joseph, 1996. p.174-176.

BALASTREIRE, Luiz Antônio. **Máquinas agrícolas**. 1.ed. São Paulo: Manole, 1987. 307p.

BARROS NETO, Benício de; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS Roy Edward. Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria. 2ª ed. Campinas: Editora da UNICAMP, 2002.

BURR-BROWN, **Catálogo Técnico**. 2005. Disponível em: <<http://www.burr-brown.com>>. Acessado em 05/09/2006

CAPPELLI, Nelson Luis; UMEZU, Cláudio Kiyoshi; MARTINS, Marcelo de Mello. Avaliação do desempenho de um dosador helicoidal para aplicação de fertilizantes sólidos. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 29. Fortaleza: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, jul. 2000, CD-Rom.

EXSTO, **Produtos – PicBox**. 2005. CD-Rom.

FAIRCHILD, **IRF640, RF1S640, RF1S640SM Data Sheet**. Disponível em: <<http://www.exsto.com.br>>. Acessado em 04/12/2006.

FEDERAÇÃO BRASILEIRA DE PLANTIO DIRETO NA PALHA. **Brasil – Expansão da Área Cultivada em Plantio Direto.** <http://www.febrapdp.org.br/pd_area_br.htm>. Acesso em 24/04/2006.

FERREIRA, Mauro F.; OLIVEIRA, Adroaldo de; MACHADO, Antônio L. T.; REIS, Ângelo V. dos; MACHADO Roberto L. T. Comportamento do dosador tipo rosca sem-fim em função do nível de adubo no depósito. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 35, 2006. João Pessoa: UFCG, jul. 2006, CD-Rom.

GARCIA, R. F., QUEIROZ, D. M. de, FERNANDES H. C., PATERNELLI, L. A. Desempenho operacional de um conjunto trator-recolhedora de feijão. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.1, p.199-206, jan./abr. 2005a.

GARCIA, Angel Pontin, ALBIERO, Daniel, CAPPELLI, Nelson Luis. Avaliação da homogeneidade de distribuição de fertilizante por um sistema de prato giratório e reservatório cônico. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 34. Canoas: ULBRA, jul. 2005b, CD-Rom.

IAP, **Solo: Fertilidade e Adubação.** Disponível em < <http://www.iap.com.br/>>. Acesso em 17/03/2006.

KEPNER, R.A.; BAINER, R.; BARGER, E.L. **Principles of farm machinery.** 3ed. Westport : Avi , 1982.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-planta.** 1^a ed., São Paulo – SP, Agronômica Ceres, 262p. 1979.

KING, B. A.; MCCANN, I. R.; EBERLEIN, C. V. E STARK, J. C. Computer control system for spatially varied water and chemical application studies with continuous-move irrigation systems. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 24, n. 3, p. 177-194, dec. 1999

KUO, B. C. **Automatic Control Systems**. 7.ed. Englewood Cliffs : Prentice Hall, 1995.

LOPES, Alfredo Sheid. **Manual Internacional de Fertilidade do Solo**: Conceitos sobre fertilidade do solo e produtividade. 2ed. Piracicaba: Potafos, 1998.

MAHL, Denise. **Desempenho de semeadoras-adubadoras de milho (*zea mays L.*) em sistema de plantio direto**. 160p. Dissertação (Mestre em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrônômicas – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”. Botucatu – SP, 2002.

MAHL, Denise; GAMERO, Carlos A.; SILVA, Paulo R. A.; YANO, Élcio H. Distribuição de fertilizante e de sementes de milho em função do nível de produto nos reservatórios e da velocidade de deslocamento. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 35, 2006. João Pessoa: UFCG, jul. 2006, CD-Rom.

MARTINS, Marcelo de Mello **Desenvolvimento de um dosador helicoidal visando sua utilização em equipamentos de aplicação localizada de fertilizantes sólidos**. 99p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas. Campinas - SP, 1999.

MENEGATTI, Franco Antonio; FORCELLINI Fernando Antônio; MARTIN, Carlos Alberto. Avaliação de um sistema de dosagem de fertilizantes para agricultura de precisão. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 33. São Pedro: EMBRAPA/UNICAMP, jul. 2004, CD-Rom.

MIALHE, L. G. **Máquinas agrícolas: ensaio & certificação**. Piracicaba: fundação de estudos agrários Luiz de Queiros, 1996.

MICROCHIP, **PIC16F87X Data Sheet**. Disponível em: <<http://www.microchip.com>>. Acessado em 21/03/2005.

MOTRON, Indústria de Motores Redutores Ltda. **Catálogo Técnico**. 2005. Disponível em: <<http://www.motron.com.br>>. Acessado em 25/11/2005.

OLIVA, Rodrigo A; CAPPELLI, Nelson Luis; UMEZU, Cláudio Kiyoshi. Máquina para aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis – adaptação de um modelo comercial convencional. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 30. Foz do Iguaçu: UNIOESTE, jul. 2001, CD-Rom.

PALACÍN, J.A. SALSE, X. CLUA, J. ARNÓ, R. BLANCO AND C. ZANUY. Center-pivot automatization for agrochemical use. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 49, n. 3, p. 419-430, dec. 2005.

RAIJ, Bernardo van. **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Agronômica Ceres Ltda., 1991.

RAFULL, L. Z. L.; SOUZA, Cristiano Márcio Alves de ; QUEIROZ, Daniel Marçal de . Una revisión sobre el control automático de la altura de corte en cosechadoras. **Revista ciências técnicas agropecuárias**, Havana, v. 13, n. 3, p. 29-35, 2004.

REIS, Ângelo V. dos; FORCELLINI, Fernando A. Identificação de requisitos de clientes para o projeto de um dosador de precisão para sementes miúdas. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.26, n.1, p.309-320, jan./abr., 2006.

RUSSO, Edison.. **Desenvolvimento de um módulo de interface para a aplicação de fertilizantes líquidos a taxas variáveis**. 89p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas, 2005.

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**, Silsoe, v. 30, n. 1-3, p.167-191, fev., 2001.

SHIPPEN, John Matthew; ELLIN, C. R.; CLOVER C. H. **Basic farm machinery**. 3ed. Oxford: Pergamon, 1980.

SILVA, Marcos Roberto da. **Classificação de semeadoras-adubadoras de precisão para o sistema plantio direto conforme o índice de adequação**. 96p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, UNICAMP, Campinas, 2003.

SILVEIRA, G.M. **As Máquinas para Plantar: aplicadores, distribuidoras, semeadoras, plantadoras e cultivadoras**. 1 ed. Rio de Janeiro: Globo, 1989. 257 p.

SCHNEIDER, Paulo A.; FEY, Emerson; ORLANDO, Auri F.; PIVETTA, Laércio A.; FURLAN, Fernando; DALLABRIDA, Willian R. Distribuição de adubos de diferentes fórmulas em mecanismos dosadores de semeadoras-adubadoras. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 34. Canoas: ULBRA, jul. 2005, CD-Rom.

SOGAARD, H. T.; KIERKEGAARD, P. Yield reduction resulting from uneven fertilizer distribution. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v. 37, p. 1749-1752, mai., 1994.

SOLDATOS, A.G.; ARVANITIS, K.G.; DASKALOV, P.I.; PASGIANOS, G.D. E SIGRIMIS, N.A. Nonlinear robust temperature–humidity control in livestock buildings. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 49, n. 3, p. 357-376, dez. 2005.

SOUZA, David José de. **Conectando o PIC 16F877A: Recursos avançados**. 1ed. São Paulo: Érica, 2003.

UMEZU, Cláudio Kiyoshi. **Sistema de controle de um equipamento de formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis**. 186p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.

UMEZU, Cláudio Kiyoshi; CAPPELLI, Nelson Luis. Controlador de um equipamento vrt para aplicação de fertilizantes sólidos: avaliação do comportamento e ajuste dos parâmetros. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 33. São Pedro: EMBRAPA/UNICAMP, jul. 2004, CD-Rom.

VILLAR, P. M. Del; GAMEIRO, A. H.; DABAT, M. H. Fatores de eficiência das culturas agrícolas no Brasil: uma comparação com os Estados Unidos e França nos casos de soja, milho e arroz. 2004. **Informações Econômicas**, São Paulo, v. 34, n. 11, p.22 - 35, nov., 2004.

YAMAMOTO Natanael T.; RESENDE Ricardo C. de; QUEIROZ Daniel M. de; SOUZA Cristiano M.A.; PANACHUKI Elói. Efeito da velocidade de operação e uniformidade longitudinal de uma adubadora puncionadora. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola**, 35, 2006. João Pessoa: UFCG, jul. 2006, CD-Rom.

YOUKER, R.E.; McGUINNESS, J.L. A short method of obtaining mean weight-diameter values of aggregate analyses of soils. **Soil Science**, Baltimore, v.83, n.4, p.291-294, Apr. 1957. **apud KIEHL, E. J. Manual de edafologia: relações solo-planta**. 1^a ed., São Paulo – SP, Agronômica Ceres, p.262, 1979.

ZANCO, Wagner da Silva. **Microcontroladores PIC: técnicas de Software e Hardware para projetos e circuitos eletrônicos com base no PIC 16F877A**. 1ed. São Paulo: Érica, 2006.

APÊNDICE A: Levantamento detalhado do custo de produção do protótipo

Componente		Quantidade	Valor unitário	Valor Total	% valor do componente	% valor Total
Motor acionamento				228,00	100,00	15,21
1	Motor elétrico 24V;110 rpm;	1,00	206,00	206,00	90,35	13,74
2	Adaptador eixo motor - dosador	1,00	12,00	12,00	5,26	0,80
3	Mão-de-obra - montagem	0,50	20,00	10,00	4,39	0,67
Circuito de Potência				44,38	100,00	37,66
1	RESISTORES DE 1.2K / 0.25W	6,00	0,01	0,06	0,01	0,00
2	RESISTORES DE 1.0K / 0.25W	4,00	0,01	0,04	0,01	0,00
3	RESISTOR DE 220R / 0.25W	1,00	0,01	0,01	0,00	0,00
4	RESISTOR DE 3.9K / 0.25W	1,00	0,01	0,01	0,00	0,00
5	RESISTOR DE 10.0K / 0.25W	1,00	0,01	0,01	0,00	0,00
6	RESISTOR DE 680R / 2.0W	1,00	0,15	0,15	0,03	0,01
7	CAPACITORES DE 100uF/25V	2,00	0,06	0,12	0,02	0,01
8	CAPACITORES DE 2N2	2,00	0,06	0,12	0,02	0,01
9	TRANSISTOR BC557	2,00	0,12	0,24	0,04	0,02
10	TRANSISTOR BC548	1,00	0,11	0,11	0,02	0,01
11	TRANSISTOR BC338	1,00	0,09	0,09	0,02	0,01
12	TRANSISTOR BC328	1,00	0,74	0,74	0,13	0,05
13	TRANSISTOR IRF640	1,00	1,76	1,76	0,31	0,12
14	BORNES DE 2 VIAS	2,00	0,59	1,18	0,21	0,08
15	DIODOS 1N4148	2,00	0,03	0,06	0,01	0,00
16	DISSIPADOR	1,00	0,61	0,61	0,11	0,04
17	DIODO BYW96E	1,00	5,57	5,57	0,99	0,37
18	BARRA PINADA DE 5 PINOS	1,00	0,05	0,05	0,01	0,00
19	JUMPER	1,00	0,02	0,02	0,00	0,00
20	CONECTOR HEADER IDC (34 PINOS)	1,00	1,35	1,35	0,24	0,09
21	CONECTOR MOLEX	1,00	0,23	0,23	0,04	0,02
22	PLACA COBRADA 10x10	1,00	1,85	1,85	0,33	0,12
23	Mão-de-obra	1,00	30,00	30,00	5,31	2,00
Bateria				260,00	46,06	17,35
1	BATERIA 12V	2,00	130,00	260,00	46,06	17,35
Filtro RC				0,07	0,01	0,00
1	RESISTOR DE 100K / 0.25W	1,00	0,01	0,01	0,00	0,00
2	CAPACITOR DE 22nF	1,00	0,06	0,06	0,01	0,00
Kit Microcontrolador				700,00	100,00	46,70
1	Kit PicBox – PIC16F877	1,00	700,00	700,00	100,00	46,70
Cabos e conectores				6,40	93,05	0,43
1	CABOS E FIOS	5,00	1,10	5,50	85,94	0,37
2	CHAVE SELETORA	1,00	0,45	0,45	0,08	0,03
3	CONECTOR DB-9 MACHO	1,00	0,45	0,45	7,03	0,03
TOTAL (R\$)					1238,85	