

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UMA SERVO-
VÁLVULA DOSADORA PARA SISTEMAS DE APLICAÇÃO
DE FERTILIZANTES LÍQUIDOS A TAXAS VARIÁVEIS**

ANDRÉ LUIZ JOHANN

CAMPINAS
DEZEMBRO DE 2004

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

**PROJETO, CONSTRUÇÃO E AVALIAÇÃO DE UMA SERVO-
VÁLVULA DOSADORA PARA SISTEMAS DE APLICAÇÃO
DE FERTILIZANTES LÍQUIDOS A TAXAS VARIÁVEIS**

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

ANDRÉ LUIZ JOHANN

Orientador: Prof. Dr. Nelson Luis Cappelli

CAMPINAS
DEZEMBRO DE 2004

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

J596p Johann, André Luiz
Projeto, construção e avaliação de uma servo-válvula dosadora para sistemas de aplicação de fertilizantes líquidos a taxas variáveis / André Luiz Johann. -- Campinas, SP: [s.n.], 2004.

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

1. Adubos e fertilizantes líquidos. 2. Agricultura e tecnologia. 3. Agricultura - Mecanização. 4. Eletrônica na agricultura. 5. Solos - Fertilidade. 6. Adubos e fertilizantes - Aplicação. I. Cappelli, Nelson Luis. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Titulo em Inglês: Project, build and evaluation of a flow control servo-valve for liquid fertilizer application in variable rates

Palavras-chave em Inglês: Liquid fertilizing, Variable rates, Precision agriculture, Servo-valve

Área de concentração: Máquinas Agrícolas

Titulação: Mestre em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: José Paulo Molin, Luis Ernesto Brossard Pérez, Antonio José da Silva Maciel.

Data da defesa: 21/12/2004

*“Benfeitor - é o que ajuda e passa.
Amigo - é o que ampara em silêncio.
Companheiro - é o que colabora sem constranger.
Renovador - é o que se renova para o bem.
Forte - é o que sabe esperar no trabalho pacífico.
Esclarecido - é o que se conhece.
Corajoso - é o que nada teme de si mesmo.
Defensor - é o que coopera sem perturbar.
Eficiente - é o que age em benefício de todos.
Vencedor - é o que vence a si mesmo. “*

*(Psicografado por Francisco Cândido Xavier,
Ditado pelo Espírito André Luiz)*

*Ao meu querido avô
Lamartine Feliciano Nogueira de Sá (in memorian),
um modelo a ser seguido por toda a vida.*

*Em especial, à minha eternamente querida irmã
Luciana Johann (in memorian),
sem a qual eu jamais teria chegado até aqui.*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos pela contribuição, direta ou indireta, para a realização deste trabalho, em especial:

- *Aos meus pais: Rui, e Iracy, pelo apoio e incentivo incondicionais, e por valorizarem a minha educação desde a minha infância;*
- *À Faculdade de Engenharia Agrícola, pela oportunidade concedida;*
- *A Empresa Jumil - Justino de Moraes Irmãos S/A, por ter permitido e incentivado um de seus colaboradores a fazer um curso de mestrado;*
- *Ao meu orientador e amigo Nelson Luis Cappelli, pela orientação, incentivo, paciência e apoio, feitos muito além do esperado;*
- *Ao professor Cláudio K. Umezu, pelas valiosas contribuições na elaboração deste trabalho;*
- *Aos professores da Feagri: Paulo S. G. Magalhães, Antonio J. S. Maciel, Oscar A. Braumbeck, José E. S. Paterniani, pelos valiosos conselhos na elaboração e avaliação deste trabalho;*
- *Ao professor Luiz E. Brossard Peres, pelas valiosas contribuições na avaliação deste trabalho;*
- *Aos amigos do Laboratório de Instrumentação e Controle: Edson Russo e Angel P. Garcia, pela inestimável ajuda na realização deste trabalho;*
- *Aos amigos da Jumil: Odracir Borghi, Fabiano Ferrera, Alex Guidetti, José Augusto, Rodrigo Luis e Geizo Drago, pelo precioso auxílio prestado;*
- *À amiga Patrícia E. Chamum, pelo apoio, carinho e amizade, e por ter colaborado na conclusão deste trabalho;*
- *Aos amigos: André, Diogo, Luis e Fábio, por terem me acolhido inúmeras vezes em sua casa, durante a realização deste trabalho;*
- *Aos colegas da Feagri: Daniel Albiero, Leandro Calve, Rafael A. Oliveira e Walterley P. Souza, pelo companheirismo e amizade;*
- *Aos meus familiares: Lydja, Reginaldo, Claudia, e em especial à Yara, pelo carinho, compreensão e incentivo para a realização deste trabalho;*
- *A Deus, acima de tudo.*

SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS.....	x
LISTA DE TABELAS	xv
LISTA DE TABELAS	xv
RESUMO	xvi
ABSTRACT.....	xviii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	3
2.1. Agricultura de precisão	3
2.1.1. Definições	3
2.1.2. Mapa de produtividade.....	5
2.1.3. Outros mapas georeferenciados	6
2.1.4. Sistema de informações geográficas (SIG)	10
2.1.5. Manejo da cultura na agricultura de precisão.....	11
2.1.6. Sistema de posicionamento global (GPS)	12
2.1.7. Aplicação de insumos a taxas variáveis	14
2.2. Fertilizantes fluídos.....	16
2.2.1. Histórico	16
2.2.2. Matérias primas.....	16
2.2.3. Fabricação	18
2.2.4. Formulação	18
2.2.5. Vantagens e desvantagens.....	20
2.2.6. Aplicação.....	21
2.3. Atuação dos fertilizantes fluídos aplicados no solo.....	25
2.3.1. Dinâmica do nitrogênio no solo	25
2.3.2. Dinâmica do fósforo no solo	27
2.3.3. Dinâmica do potássio no solo	28
2.4. Sistemas de aplicação.....	28
2.4.1. Reservatório	29

2.4.2. Bombas	33
2.4.3. Válvulas e distribuição	37
2.4.4. Controle	43
2.4.5. Sistemas de aplicação de fertilizantes líquidos comerciais.....	49
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	55
3.1. Sistema de aplicação de fertilizantes líquidos.....	55
3.2. Desenvolvimento da bancada de testes.....	55
3.3. Seleção da válvula dosadora.....	56
3.3.1. Identificação das válvulas comerciais.....	56
3.3.2. Avaliação das válvulas comerciais.....	56
3.4. Desenvolvimento da válvula dosadora	57
3.4.1. Projeto e construção.....	57
3.4.2. Planejamento experimental	57
3.4.3. Critério de avaliação	59
3.5. Modelo matemático do sistema	61
3.5.1. Planejamento experimental do modelo linear.....	61
3.5.1.1. Variável resposta.....	62
3.5.1.2. Fatores.....	62
3.5.1.3. Níveis dos fatores.....	62
3.5.1.4. Planejamento fatorial	62
3.5.1.5. Matriz dos coeficientes de contraste.....	63
3.5.1.6. Estimativa do erro experimental	64
3.5.1.7. Modelo estatístico	64
3.5.1.8. Cálculo dos coeficientes b_n	64
3.5.2. Planejamento experimental do modelo quadrático.....	65
3.5.2.1. Níveis dos fatores.....	65
3.5.2.2. Planejamento fatorial	66
3.5.2.3. Cálculo da Matriz dos Coeficientes de Contraste.....	67
3.5.2.4. Estimativa do erro experimental	68
3.5.2.5. Modelo estatístico	68
3.5.2.6. Cálculo dos coeficientes b_n	68

3.5.3. Validação do modelo.....	68
3.5.3.1. Coeficiente de determinação	68
3.5.3.2. Análise de variância	69
3.5.3.3. Distribuição dos resíduos:	70
3.6. Infra-estrutura para ensaio do protótipo	71
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	75
4.1. Sistema de aplicação	75
4.2. Protótipo experimental.....	78
4.2.1. Descrição da Bancada de Testes Desenvolvida.....	78
4.2.2. Parâmetros de operação	80
4.2.3. Dimensionamento da Bancada de testes	81
4.3. Seleção da válvula dosadora	82
4.3.1. Identificação das válvulas comerciais.....	83
4.3.2. Avaliação das válvulas comerciais	83
4.4. Desenvolvimento da servo-válvula dosadora	84
4.4.1. Projeto e construção.....	84
4.4.2. Avaliação preliminar e correções	86
4.4.3. Avaliação final.....	90
4.5. Modelo matemático completo da válvula dosadora.....	95
4.5.1. Levantamento do modelo matemático linear	96
4.5.2. Validação do modelo matemático linear.....	99
4.5.2.1. Coeficiente de determinação	99
4.5.2.2. Análise de variância	99
4.5.2.3. Análise da distribuição dos resíduos	100
4.5.3. Levantamento do modelo matemático quadrático	105
4.5.4. Validação do modelo matemático quadrático.....	109
4.5.4.1. Coeficiente de determinação	109
4.5.4.2. Análise de variância	110
4.5.4.3. Distribuição dos resíduos	111
4.5.4.4. Ajuste fino do modelo quadrático	115
4.6. Estimativa de custos para a fabricação do protótipo da válvula.....	117

5. CONCLUSÕES.....	119
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	121
7. APÊNDICE	123
8. ANEXO.....	125
9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	129

LISTA DE FIGURAS

	Página
<i>Figura 1 - Ilustração de um mapa de produtividade obtido diretamente no campo (FUNDAÇÃO ABC)</i>	<i>6</i>
<i>Figura 3 - Ilustração de uma malha de amostragem de solo (FUNDAÇÃO ABC, 2003)</i>	<i>7</i>
<i>Figura 4 - Ilustração do mapa de fertilidade do solo, em termos de níveis de potássio (FUNDAÇÃO ABC, 2003).....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 5 - Ilustração de um mapa de fertilidade do solo, em termos de níveis de fósforo (FUNDAÇÃO ABC, 2003).....</i>	<i>9</i>
<i>Figura 6 - Fotos da floresta Amazônica na área dos estados de Tocantins, Maranhão e Pará, tiradas pelo satélite Landsat 7. A foto da esquerda foi tirada em agosto de 1995 e a foto da direita foi tirada em maio de 1997 (NASA, 2005)</i>	<i>10</i>
<i>Figura 7 - Ilustração de uma operação de interpolação feita por uma ferramenta SIG. Em A, o mapa de origem. Em B, o mapa obtido pela interpolação (FUNDAÇÃO ABC, 2003)</i>	<i>11</i>
<i>Figura 8 - A) Exemplo do emprego de um aplicador de líquidos incorporado a uma máquina de plantio. B) Detalhe do dispositivo (FIXEN, 1994).....</i>	<i>23</i>
<i>Figura 9 - Sistema para a aplicação pontual de nitrogênio líquido (BAUTISTA et al., 2001)</i>	<i>23</i>
<i>Figura 10 - Dispositivo de aplicação de fertilizante líquido no solo no solo em camada sub-superficial, para plantio direto (YETTER FARM PRODUCTS, 2003).....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 11 - A) Dispositivo de aplicação de fertilizante líquido no solo utilizando haste flexível. B) Detalhe da haste flexível (BRAGACHINI et al., 2001)</i>	<i>24</i>
<i>Figura 12 - Diagrama em blocos básico de um sistema de aplicação de fertilizantes líquidos a taxas variáveis.....</i>	<i>29</i>
<i>Figura 13 - Reservatório acoplado a barra porta-ferramentas do trator (SPRAYING SYSTEMS, 2004)</i>	<i>29</i>

<i>Figura 14 - Reservatório disposto em uma carreta tracionada (ARAÚJO FILHO, 1994).....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 15 - Reservatório localizado na parte lateral do trator (ARAÚJO FILHO, 1994).....</i>	<i>31</i>
<i>Figura 16 - Sistema autopropelido, onde um caminhão é adaptado para receber um reservatório de alta capacidade mais o sistema de aplicação (SPRAYING SYSTEMS, 2004)</i>	<i>31</i>
<i>Figura 17 - Ilustração do sistema de agitação hidromecânica (PERTICARRARI & BRAUNBECK, 1986)</i>	<i>32</i>
<i>Figura 18 - Diagrama de um sistema de aplicação de fertilizantes líquidos utilizando uma bomba centrífuga (BOARETO et al., 1991)</i>	<i>34</i>
<i>Figura 19 - Ilustração de uma bomba peristáltica (BOARETO et al., 1991)</i>	<i>35</i>
<i>Figura 20 - Válvula globo convencional tipo sede simples. (a) O obturador é guiado duplamente e desce para cortar o fluxo. (b) O obturador é guiado duplamente e desce para liberar o fluxo. (c) O obturador é guiado apenas na parte superior e desce para cortar o fluxo (NETO & CARDOSO, 1999) ...</i>	<i>38</i>
<i>Figura 21 - Válvula globo convencional tipo sede dupla. (a) O obturador desce para cortar o fluxo. (b) O obturador desce para liberar o fluxo (NETO & CARDOSO, 1999)</i>	<i>39</i>
<i>Figura 22 - Válvula globo tipo gaiola balanceada (NETO & CARDOSO, 1999)</i>	<i>40</i>
<i>Figura 23 - Ilustração de uma válvula globo com obturador cônico, denominada de válvula de agulha (MACYNTYRE, 1997)</i>	<i>41</i>
<i>Figura 24 - Ilustração de uma válvula borboleta (NETO & CARDOSO, 1999)</i>	<i>42</i>
<i>Figura 25 - Central de controle para aplicação de fertilizantes fluídos a taxa fixa. Também aplica a taxas variáveis recebendo as informações através de um computador externo (DICKY JOHN, 2003)</i>	<i>45</i>
<i>Figura 26 - Central de controle para a aplicação de fertilizantes líquidos a taxa fixa, também variando a formulação através de nutrientes diluídos em água. Também aplica a taxas variáveis recebendo as informações através de um computador externo (MIDWEST TECNOLOGY, 2003)</i>	<i>45</i>

<i>Figura 27 - Console do sistema Legacy 6000, da Midwest Technology, efetua diversas funções simultaneamente, aplicação a taxas variáveis, piloto automático, controle de navegação e mapeamento em tempo real (Spraying Systems, 2004)</i>	<i>46</i>
<i>Figura 28 - Central de controle SCS 760, para a aplicação de fertilizantes líquidos a taxa fixa, também variando a formulação através de nutrientes diluídos em água. Aplica a taxas variáveis recebendo as informações através de um computador externo (RAVEN INDUSTRIES, 2003)</i>	<i>47</i>
<i>Figura 29 - Console de controle EAGLE E15, para a aplicação de até quatro insumos diferentes a taxas fixas. Também aplica a taxas variáveis recebendo as informações de um controlador externo do mesmo fabricante (KEE TECHNOLOGIES, 2005).....</i>	<i>47</i>
<i>Figura 30 - Console de controle ZYNX X15, para a aplicação de até quatro insumos diferentes a taxas variáveis, em sistemas de malha fechada, podendo chegar a 256 insumos em malha aberta. Também efetua outras funções, como monitor de sementes e piloto automático. As quatro figuras representam respectivamente as telas para: A) aplicação de fertilizantes sólidos ou líquidos; B) aplicação de fertilizantes a lanço; C) aplicação a taxas variáveis através de um mapa de aplicação; D) controle do trator por piloto automático (KEE TECHNOLOGIES, 2005)</i>	<i>49</i>
<i>Figura 31 - Sistema de aplicação de fertilizantes líquidos, 12-Row Hydraulic Double Fold Applicator, fabricado pela Adams Fertilizer (DEALER AND APPLICATOR, 2003).....</i>	<i>50</i>
<i>Figura 32 - A) Sistema de aplicação de fertilizantes líquidos, Coulter Knife Injection Applicator, da KBH Corp, com os aplicadores instalados na traseira do implemento. B) Outro implemento, o Front-Mount Toolbar Applicator, do mesmo fabricante, com os aplicadores instalados a frente do reservatório de fertilizante (DEALER AND APPLICATOR, 2003)</i>	<i>50</i>
<i>Figura 33 - Foto do 2450 Dual Placement Applicator, sistema de aplicação de fertilizantes líquidos (PROGRESSIVE FARM PRODUCTS INC., 2003).....</i>	<i>51</i>

<i>Figura 34 - A) Sistema para aplicação de fertilizantes líquidos operando com subsolador. B) Mesmo sistema operando com aplicação sobre o sulco (AGCHEM EUROPE B.V., 2003)</i>	<i>51</i>
<i>Figura 35 - Diagrama esquemático da bancada de testes, incluindo a infra-estrutura de ensaios</i>	<i>72</i>
<i>Figura 36 - Diagrama esquemático do circuito hidráulico responsável pela aplicação de um dos três concentrados, juntamente com o amplificador PWM.....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 37 - Diagrama esquemático, com a visão geral do sistema de aplicação</i>	<i>77</i>
<i>Figura 38 - Diagrama esquemático da bancada de testes desenvolvida</i>	<i>79</i>
<i>Figura 39 - Vista em corte do primeiro protótipo da servo-válvula dosadora desenvolvida</i>	<i>86</i>
<i>Figura 40 - Ensaio com o primeiro protótipo da servo-válvula dosadora desenvolvida, pressão de 100 kPa, operação de abertura e fechamento</i>	<i>87</i>
<i>Figura 41 - Gráfico do ensaio de avaliação da folga na rosca do fuso da servo-válvula dosadora desenvolvida</i>	<i>88</i>
<i>Figura 42 - Vista em corte da servo-válvula dosadora desenvolvida após implementadas as correções</i>	<i>89</i>
<i>Figura 43 - Vista em explosão da servo-válvula dosadora desenvolvida</i>	<i>89</i>
<i>Figura 44 - Ensaio com o segundo protótipo da servo-válvula dosadora desenvolvida em operações de abertura</i>	<i>90</i>
<i>Figura 45 - Ensaio preliminar da servo-válvula dosadora desenvolvida em operações de fechamento.....</i>	<i>91</i>
<i>Figura 46 - Gráfico com os resultados dos ensaios finais com a servo-válvula dosadora desenvolvida, a uma pressão de 100 kPa.....</i>	<i>92</i>
<i>Figura 47 - Gráfico dos resultados dos ensaios finais com a servo-válvula dosadora desenvolvida, a uma pressão de 50 kPa.....</i>	<i>94</i>
<i>Figura 48 - Dados médios com as respectivas funções polinomiais e curvas de ajuste quadráticas.....</i>	<i>95</i>
<i>Figura 49 - Gráfico com a superfície de resposta do modelo matemático linear, descrito na forma de curvas de nível</i>	<i>99</i>

<i>Figura 50 - Gráfico da distribuição dos resíduos da estimativa obtidos com os valores utilizados para o levantamento do modelo matemático linear.....</i>	<i>101</i>
<i>Figura 51 - Representação gráfica dos valores experimentais e os previstos pela reta do modelo matemático linear, para três diferentes pressões de trabalho, obtidos com os dados do ensaio de resíduos complementar</i>	<i>104</i>
<i>Figura 52 - Representação gráfica dos resíduos obtidos para o modelo linear no ensaio de resíduos complementar.....</i>	<i>105</i>
<i>Figura 53 - Gráfico com a superfície de resposta do modelo matemático quadrático, descrito na forma de curvas de nível</i>	<i>109</i>
<i>Figura 54 - Distribuição dos resíduos da estimativa obtidos com os valores utilizados para o levantamento do modelo matemático quadrático.....</i>	<i>111</i>
<i>Figura 55 - Representação gráfica dos valores experimentais e os previstos pela reta do modelo matemático quadrático, para três diferentes pressões de trabalho, obtidos no ensaio complementar.....</i>	<i>114</i>
<i>Figura 56 - Representação gráfica dos resíduos obtidos com o modelo quadrático, obtidos no ensaio complementar.....</i>	<i>115</i>
<i>Figura 57 - Representação gráfica dos valores experimentais e os previstos pela curva do modelo matemático quadrático ajustado, para três diferentes pressões de trabalho</i>	<i>116</i>
<i>Figura 58 - Representação gráfica dos resíduos obtidos com o modelo quadrático ajustado.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 59 - Desenho de conjunto da válvula dosadora desenvolvida.</i>	<i>123</i>

LISTA DE TABELAS

	Página
<i>Tabela 1 - Matérias primas para a produção de adubos fluidos (MALAVOLTA,1994)</i>	<i>17</i>
<i>Tabela 2 - Principais formulações comercializadas no Brasil (MALAVOLTA, 1994)</i>	<i>19</i>
<i>Tabela 3 - Níveis e valores absolutos dos fatores</i>	<i>62</i>
<i>Tabela 4 - Resultado do planejamento fatorial 2² com repetições no nível central.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 5 - Coeficientes de contraste para um fatorial 2² com repetições no nível central.....</i>	<i>63</i>
<i>Tabela 6 - Níveis e valores absolutos dos fatores para o planejamento em estrela</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 7 - Resultado do planejamento fatorial 2² em estrela com repetições no nível central.....</i>	<i>66</i>
<i>Tabela 8 - Coeficientes de contraste para um planejamento fatorial 2² em estrela com repetições no nível central.....</i>	<i>67</i>
<i>Tabela 9 - Resultados dos ensaios finais da servo-válvula dosadora desenvolvida a 100kPa.....</i>	<i>92</i>
<i>Tabela 10 - Resultados dos ensaios finais da servo-válvula dosadora desenvolvida a 50kPa.....</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 11 - Dados obtidos no ensaio com o planejamento multifatorial 2²</i>	<i>96</i>
<i>Tabela 12 - Resumo estatístico dos resultados do ensaio</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 13 - Análise de variância para o modelo linear.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabela 14 - Dados do ensaio complementar de validação da servo-válvula dosadora, estimativa, e resíduos obtidos com o modelo linear</i>	<i>102</i>
<i>Tabela 15 - Dados obtidos no ensaio com o planejamento multifatorial 2² em estrela.....</i>	<i>106</i>
<i>Tabela 16 -Resumo estatístico dos resultados do ensaio do planejamento em estrela.....</i>	<i>107</i>
<i>Tabela 17 - Análise de variância do modelo quadrático</i>	<i>110</i>
<i>Tabela 18 - Dados do ensaio de validação da servo-válvula dosadora, estimativa, e resíduos obtidos com o modelo quadrático.....</i>	<i>112</i>
<i>Tabela 19 - Levantamento de custo da válvula dosadora desenvolvida</i>	<i>118</i>
<i>Tabela 20 - Dosagens máximas e mínimas de NPK, intependete da produção esperada..</i>	<i>125</i>

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo projetar, construir e avaliar uma servoválvula dosadora para a aplicação de fertilizantes líquidos a taxas variáveis, bem como conceber um sistema com capacidade para formulação e dosagem no qual a válvula poderá operar.

Foi concebido um sistema capaz de trabalhar com três formulações de concentrados simultaneamente, utilizando-se três circuitos hidráulicos independentes. Cada um destes circuitos deve ser dotado de uma bomba centrífuga capaz de fornecer pressão e vazão à linha hidráulica para possibilitar a operação de uma válvula dosadora controlada eletricamente.

Uma bancada de testes foi desenvolvida para a realização de ensaios experimentais, cuja finalidade foi a de avaliar o desempenho da servo-válvula. Esta bancada representa um circuito simplificado do sistema concebido.

A válvula dosadora pode ser considerada o elemento mais importante do sistema de aplicação de fertilizantes concebido. A proposta inicial contemplava a utilização de válvulas com acionamento por solenóide, por meio de um sinal PWM, no entanto, esta alternativa não se mostrou viável tecnicamente. Desta forma, foi necessário o desenvolvimento de uma nova válvula para atender aos requisitos de operação do sistema. A válvula dosadora desenvolvida é dotada de um acionamento mecânico feito por meio de um servo-motor. O controle do fluxo é feito por meio de um obturador cônico. A válvula foi avaliada quanto ao seu comportamento, apresentando boa repetitividade, presença de histerese e resposta tipicamente quadrática. O efeito da histerese pôde ser evitado efetuando-se o ajuste da válvula somente em operações de abertura ou de fechamento e a resposta quadrática não representa um problema. Devido a um problema de inflexão na faixa inicial da curva de fechamento da válvula, esta foi restringida para valores acima de 25%.

Depois de avaliada e aprovada a válvula, foram realizados ensaios visando à obtenção de um modelo matemático experimental do comportamento da vazão em termos do seu percentual de abertura e pressão de trabalho. O método experimental empregado foi o planejamento multifatorial 2^k . O critério de avaliação do modelo incluía o cálculo do seu coeficiente de determinação R^2 , uma análise de variância e uma análise de resíduos. Primeiramente foi obtido um modelo matemático linear, que apresentou um bom ajuste segundo o coeficiente de determinação, bem como apresentou uma boa significância

estatística, segundo a análise de variância. No entanto, os resíduos do modelo linear não se mostraram bons, apresentando tendência. Partiu-se então para a obtenção de um modelo matemático quadrático que também apresentou um bom ajuste e uma boa significância estatística, diferenciando-se pelo fato de ter sido minimizada a tendência observada nos seus resíduos em relação ao modelo linear. O modelo quadrático inicialmente possuía a característica de superestimar os valores de vazão, a qual foi eliminada por meio de um ajuste fino do termo constante do modelo.

A servo-válvula desenvolvida, bem como o modelo experimental obtido, atenderam ao objetivo deste trabalho. O protótipo operou de forma satisfatória com o fluido de trabalho utilizado e o modelo matemático descreveu adequadamente o comportamento da válvula dosadora.

Palavras-chave: fertilização líquida, taxas variáveis, agricultura de precisão.

ABSTRACT

This work had as aim to project, to build and to evaluate a flow control servo-valve for liquid fertilizer application in variable rates, as well as to conceive a system with capacity for formulation and dosage in which the valve can operate.

It was conceived a system capable to work with three concentrate formulations simultaneously, using three independent hydraulic circuits. Each one of these circuits should be endowed with a centrifuge pump capable to supply pressure and flow to the hydraulic line to make possible the flow control valve operation controlled electrically.

A workbench was built for the experimental rehearses accomplishment, whose purpose was of evaluating its acting. This workbench represents a conceived system simplified circuit.

A flow control valve can be considerate the most important element of the developed fertilizer application system. The initial proposal contemplated the use of solenoid driven valves by means of a PWM (Pulse Wave Modulation) sign; however this alternative was not shown technically viable. This way, it was necessary the new valve development to assist to the operation system requirements. The developed flow control valve mechanical driving is made through a servomotor. The flow control is made by means of a conical obturator. The valve behavior was evaluated, presenting good repetibility, presence of hysteresis and an answer typically quadratic. The hysteresis effect can be avoided being made the valve adjustment only in opening or closing operations. The quadratic answer does not represent a problem. Due to inflection problem, in the initial rate of the valve closing curve, this was restricted for values above 25%.

After the valve has been evaluated and approved, tests were accomplished seeking the obtaining of a flow behavior experimental mathematical model in terms of its opening percentile and work pressure. The used experimental method was the 2^k multifactor planning. The model evaluation criterion included the R^2 determination coefficient calculation, a variance analysis and a residues analysis. Firstly it was obtained a linear mathematical model that presented a good adjustment according to the determination coefficient. It also presented a good statistical significance in agreement with the variance analysis. However, the linear model residues were not shown good, presenting tendency. Then, it was followed the

quadratic mathematical model obtention. That also presented a good adjustment and a good statistical significance, differing for the fact of the observed tendency in its residues having been minimized in relation to the linear model. The quadratic model initially had the characteristic of overestimating the flow values, which was eliminated by means of a model constant term fine adjustment.

The developed servo-valve and the obtained experimental model assisted to the aim of this work. The prototype of this work operated in a satisfactory way with the fluid work used. The mathematical model described the flow control valve behavior appropriately.

Keywords: liquid fertilizing; variable rates; precision agriculture.

1. INTRODUÇÃO

A busca por maiores produtividades tem sido, até pouco tempo, a maior preocupação existente no setor agrícola. Atualmente, com o desenvolvimento de uma mentalidade conservacionista, mais preocupada com as questões de ordem ecológica, a demanda por tecnologias capazes de elevar a produtividade de forma sustentável, ocasionando um menor impacto ambiental, tem se elevado de forma bastante significativa.

Práticas de agricultura convencional consideram um campo cultivado como uma área uniforme, como conseqüência tem-se as taxas de aplicação de fertilizantes e defensivos constantes por todo o terreno GOERING (1992). Estas práticas têm sido amplamente utilizadas até os dias de hoje, apesar do conhecimento de que disponibilidade dos nutrientes das plantas no solo varia em função da posição no campo. As atuais preocupações com questões econômicas e ambientais estão direcionando a agricultura para a adoção de sistemas de gerenciamento específico, uma vez que os avanços tecnológicos deste setor têm possibilitado a adoção desta técnica.

Para GOERING (1993) em um sistema de gerenciamento específico de cultivo, sementes, fertilizantes e defensivos agrícolas, são aplicados a taxas variáveis conforme a demanda presente em cada ponto específico do solo. Comparado à tradicional aplicação uniforme de fertilizantes, o sistema de aplicação a taxas variáveis pode economizar materiais sem prejuízo na produtividade, além de reduzir os efeitos de degradação ambiental, uma vez que reduz excessos.

A agricultura de precisão está munida de ferramentas que possibilitam a sua atuação no desenvolvimento de sistemas capazes de operar de forma diferenciada, em função da situação particular de cada fração da área cultivada. Com o principal objetivo de otimizar os sistemas e processos existentes no setor agrícola, as pesquisas neste setor, dentre outras coisas, atuam no desenvolvimento de equipamentos e sistemas de gerenciamento capazes de operar de forma adequada, respeitando as particularidades de cada situação e dos fenômenos envolvidos dentro do processo que se deseja controlar.

Uma das principais causas da variabilidade espacial da produtividade em uma lavoura está diretamente relacionada com a disponibilidade localizada de fertilizantes no solo. Em

função disto, a necessidade do desenvolvimento de máquinas para a aplicação de fertilizantes a taxas variáveis mais sofisticadas, está sempre presente.

Tradicionalmente emprega-se o adubo sólido como elemento nutriente das plantas aplicado no solo. No entanto, MALAVOLTA (1994) demonstra que se pode obter produtividades mais elevadas com a adoção da adubação fluída. O uso deste tipo de fertilizante possibilita um maior controle da sua localização no solo, bem como da quantidade aplicada. Outros aspectos, como a redução de problemas de segregação e a maior uniformidade das soluções líquidas, bem como a maior facilidade na implementação de sistemas mais precisos para a aplicação de fluídos, em relação a sólidos, são um forte argumento para a adoção deste sistema.

Atualmente, o uso da adubação fluída no Brasil é pouco difundido, conseqüentemente existem poucos trabalhos desenvolvidos nesta área. Nos EUA esse tipo de fertilizante já é bastante difundido, cerca de 57% do N consumido provém dos fertilizantes fluídos, sendo 37% consumido na forma de amônia. Percebe-se que o potencial existente neste tipo de fertilização, principalmente no que tange ao desenvolvimento de um sistema de aplicação de fertilizantes a taxas variáveis, é bastante significativo, tendo-se em vista as vantagens que este trás. O desenvolvimento de trabalhos bem sucedidos neste setor pode alavancar um novo crescimento para o emprego dos fertilizantes fluídos no país.

Sendo assim os objetivos deste trabalho foram:

- Idealizar um sistema para aplicação de fertilizantes líquidos a taxas variáveis, com capacidade de formulação e dosagem, que possa ser utilizado em implementos de manejo de solo já existentes;
- Idealizar e desenvolver uma servo-válvula capaz de efetuar a dosagem de diferentes formulações de fertilizantes líquidos, atendendo a uma proposta de custo reduzido mantendo uma boa precisão;
- Avaliar o comportamento da servo-válvula desenvolvida.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Agricultura de precisão

2.1.1. Definições

Diferente do que se possa imaginar, o conceito da agricultura de precisão não é novo. Conforme MACHADO (2000) o planejamento da irrigação e fertirrigação pode ser considerado como uma das técnicas relativas à agricultura de precisão. Segundo BALASTREIRE (1999) os seus conceitos foram introduzidos em 1929 com as primeiras iniciativas para o gerenciamento localizado de culturas. Ele afirma que hoje pode-se definir a agricultura de precisão como um conjunto de técnicas que permite o gerenciamento localizado das culturas.

OSEKI (1998) descreve o fundamento básico da agricultura de precisão, na acepção exata da palavra, como sendo a utilização precisa de um conjunto de conhecimentos técnicos com o objetivo de aumentar a produtividade de uma determinada área, através da adoção do gerenciamento das práticas culturais, de forma a aplicar racionalmente os insumos agrícolas considerando-se as variações existentes dentro de cada talhão da propriedade. Neste sentido, a delimitação dos talhões deve ser feita em função das características físicas, químicas e biológicas de cada área, tais como: fertilidade, acidez, textura, teor de matéria orgânica, umidade do solo, grau e infestação de pragas, doenças, ervas daninhas, produtividade, dentre outros.

O mesmo autor define a agricultura de precisão como sendo uma técnica de gerenciamento agrícola a qual consiste, a princípio, em elaborar mapas georreferenciados digitais, descrevendo os fatores de produtividade em função da variabilidade espacial e temporal de cada área, objetivando a implementação de medidas corretivas de modo a se obter a máxima produtividade de cada área, com o menor custo e o menor impacto ambiental.

Para JORGE e TORRE NETO (2002) a agricultura de precisão é uma técnica de gerenciamento sistêmico e otimizado do sistema de produção através do domínio da informação, com a utilização de uma série de tecnologias e tendo como peça chave o

posicionamento geográfico. Eles afirmam que a contínua obtenção de informações detalhadas e espacialmente localizadas da cultura, bem como o seu emprego para otimizar o manejo, é a essência da agricultura de precisão.

Para TSCHIEDEL e FERREIRA (2002) a agricultura de precisão é um termo aplicado a uma larga ordem de tópicos relacionados ao manejo preciso de pequenas áreas dentro do campo, contrastando com o sistema de manejo tradicional que trata o campo de forma uniforme.

Para MANZATTO et al. (1999) a agricultura de precisão tem como principal objetivo o de aplicar no local correto e no momento adequado, as quantidades de insumos necessários à produção agrícola, para áreas cada vez menores e mais homogêneas, tanto quanto a tecnologia e os custos envolvidos permitirem.

Segundo MACHADO (2000) a agricultura de precisão não deve ser entendida como uma técnica que busca a obtenção de uma produtividade uniforme em toda a área cultivada, mas sim como um gerenciamento localizado que propicia identificar a diversidade no potencial de produtividade e das condições ambientais, respeitando a particularidade de cada local.

Além da definição descrita no parágrafo anterior, o autor faz um comentário que descreve de forma bastante interessante um aspecto importante da agricultura de precisão, segundo ele pode se resumir o tema afirmando que “a Agricultura de Precisão é amparada pelo Princípio da Parcimônia ou da Moderação”.

A variabilidade espacial do solo pode ser bastante grande, chegando a ocorrer diferentes tipos de solo, com diferentes propriedades físicas, químicas e microbiológicas dentro uma mesma área, mesmo sendo esta considerada pequena. Um exemplo da variabilidade espacial, bem como da disponibilidade de nutrientes do solo e o seu conseqüente reflexo na cultura foram observados por BALASTREIRE et al. (2002) em um ensaio realizado em uma propriedade localizada no município de Espírito Santo do Pinhal, onde se observou a ocorrência de uma variação na produtividade de até 12,9 vezes entre um ponto e outro, dentro de um talhão de 1,2 ha.

Segundo PAGNANO & MAGALHÃES (2003), OSEKI (1998) e JORGE & TORRE NETO (2002), o atual conceito predominante de manejo trata o solo de forma homogênea, através de valores médios, máximos e mínimos. Deste modo a aplicação de insumos e

defensivos ocorre de maneira uniforme, não considerando as variações existentes. Tal atitude traz como consequência a aplicação excessiva de fertilizantes ou defensivos em regiões férteis ou com baixa incidência de pragas. Do mesmo modo, pode ocorrer a aplicação insuficiente destes elementos nas regiões onde eles seriam realmente necessários. Percebe-se com isso as sérias consequências envolvidas, tais como o prejuízo advindo do gasto desnecessário com defensivos e insumos; a menor produtividade das áreas insuficientemente tratadas; os danos ambientais provenientes do escoamento superficial e da percolação para os lençóis de água do excedente destes produtos que não foram retidos pelo solo ou pela cultura.

A agricultura de precisão, como hoje a conhecemos, trabalha lançando mão de uma série de recursos e produtos tecnológicos modernos. Quando se houve falar neste tema imediatamente associam-se siglas como SIG (Sistema de Informações Geográficas), GPS (Global Position System), DGPS (Differential Global Position System). São recursos de *hardware* e *software* difundidos recentemente e que contribuem de forma inigualável nas atividades agrícolas, viabilizando o desenvolvimento de uma série de ferramentas que anteriormente não poderiam ser concebidas.

Segundo DAVIS et al. (1998) a agricultura de precisão une as novas tecnologias, nascidas da era da informação, com uma indústria agrícola madura, integrando um sistema de cultivo que considera as atuais necessidades de cada uma das pequenas áreas que compõe a área total cultivada. Para eles, esse conceito não é algo novo, mas novas tecnologias têm propiciado um emprego prático deste conceito dentro da produção agrícola.

2.1.2. Mapa de produtividade

Quando se inicia um sistema de cultivo baseado nos conceitos da agricultura de precisão, o primeiro passo a ser dado é a obtenção de informações que permitam delinear, mesmo que de forma aproximada, as áreas cujos solos em seu interior apresentam-se relativamente uniformes. Geralmente, a forma de se conseguir isso se inicia através da obtenção de um mapa de produtividade. Segundo BALASTREIRE et al. (2002) essa é uma das fases que hoje apresenta a maior facilidade de execução, em função do grande número de pesquisas já realizadas em países mais desenvolvidos e o grande número de opções de equipamentos existentes para essa finalidade.

A obtenção de um mapa de produtividade é feita através de um conjunto de equipamentos instalados na própria máquina responsável pela colheita (OSEKI, 1998). Esses equipamentos efetuam constantemente a medida da quantidade de produto colhido durante toda a operação de colheita. Essa medida, realizada por sensores ligados a um sistema de aquisição de dados, é armazenada em um banco de dados eletrônico conjuntamente com a informação das coordenadas de onde ela foi obtida. A Figura 1 ilustra um exemplo de um mapa de produtividade obtido desta forma.

O sistema de aquisição de dados nada mais é que um aparelho capaz transformar o valor da leitura efetuada pelo sensor, em uma informação digital. A obtenção das coordenadas é feita por equipamento específico, denominado GPS (Global Position System) ou DGPS (Differential Global Position System).

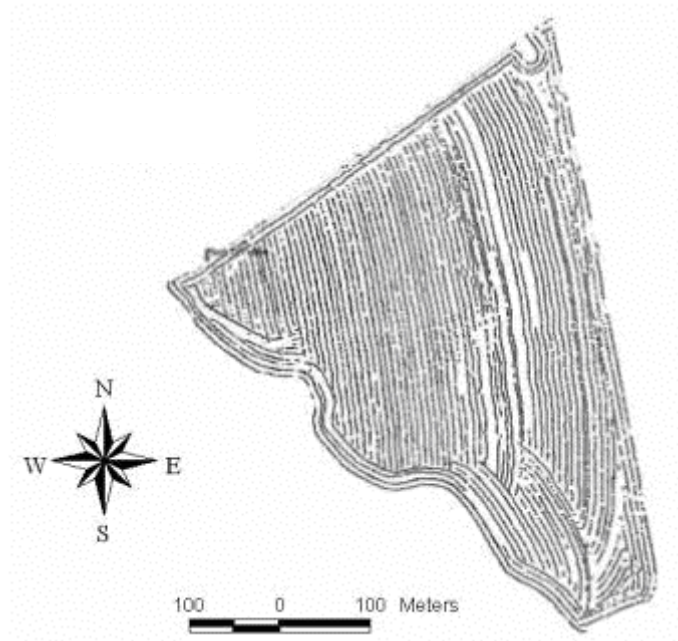


Figura 1 - Ilustração de um mapa de produtividade obtido diretamente no campo (FUNDAÇÃO ABC)

2.1.3. Outros mapas georeferenciados

Após a obtenção do mapa de produtividade um segundo passo seria procurar as explicações para as variações descritas neste mapa. Dependendo das condições da cultura, um menor ou maior número de informações será necessário. Normalmente, um mapa de fertilidade, bem como mapas caracterizando outras propriedades do solo e das plantas são

necessários. OSEKI (1998), explica que para a caracterização do solo poderá ser necessário o levantamento de informações como: profundidade, textura, teor de matéria orgânica, teor de macro e micronutrientes, pH, compactação, umidade, etc. Para cada característica do solo um mapa diferente é gerado. Percebe-se então, que terão de ser analisados diversos mapas para que se obtenha uma explicação satisfatória e confiável a cerca do que esta levando uma determinada área a produzir mais ou menos.

A obtenção de informações que descrevam as diferentes características do solo é mais complexa que o levantamento de um mapa de produtividade. É necessário que seja feita uma amostragem de diversos pontos do local para a se conseguir os mapas. A determinação dos pontos de amostragem geralmente segue uma malha (*grid*). Segundo a FUNDAÇÃO ABC (2003) há uma grande controvérsia em relação à densidade das amostras. Uma alternativa utilizada é a aplicação de uma menor densidade por toda a área, concentrando pontos em sub-malhas situadas em regiões com características mais relevantes, tais como, as com maior infestação de pragas, ou com produtividades muito baixas ou muito elevadas. A Figura 2 ilustra uma malha simples de amostragem.

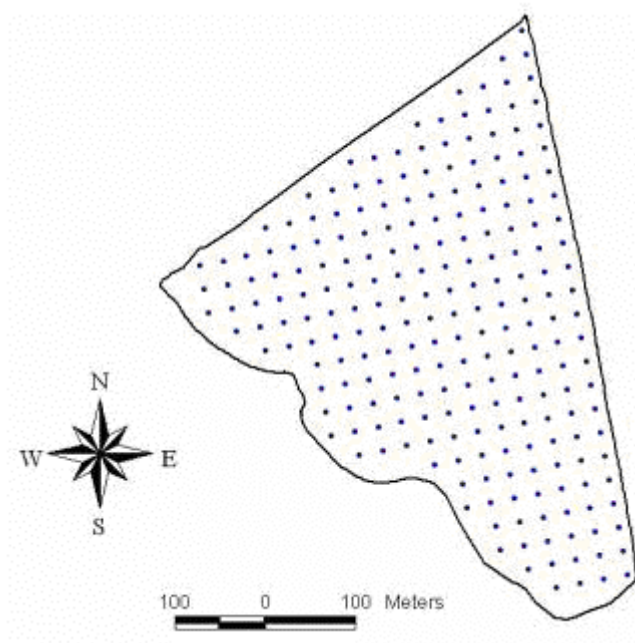


Figura 2 - Ilustração de uma malha de amostragem de solo (FUNDAÇÃO ABC, 2003)

A análise do solo amostrado nestas malhas permite a elaboração de mapas tais como os descritos na Figura 3 e Figura 4.

**Mapa de Fertilidade
Potássio - CDT, Fund. ABC
Parceria - Serrana**

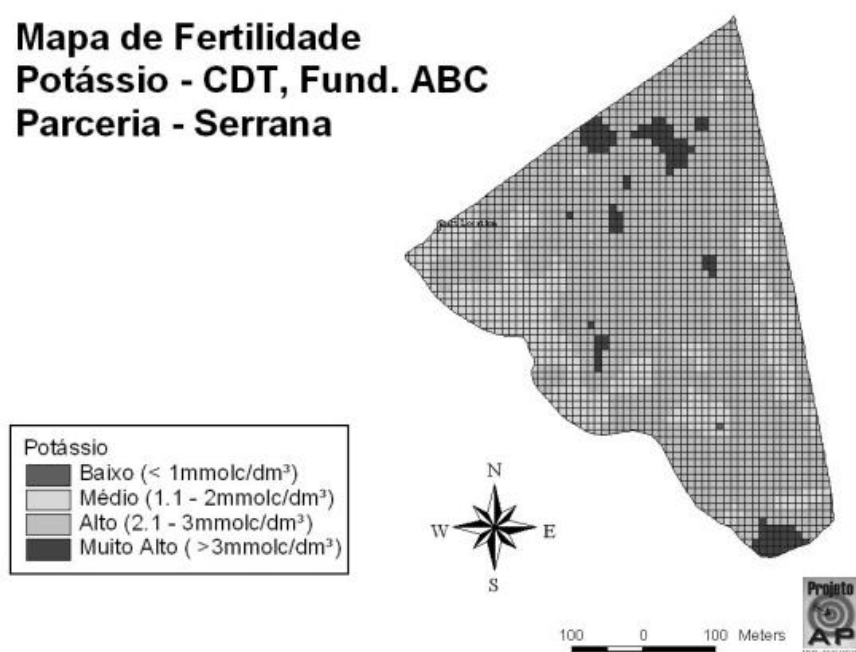


Figura 3 - Ilustração do mapa de fertilidade do solo, em termos de níveis de potássio (FUNDAÇÃO ABC, 2003)

Mapa de Fertilidade Fósforo - CDT, Fund. ABC Parceria - Serrana

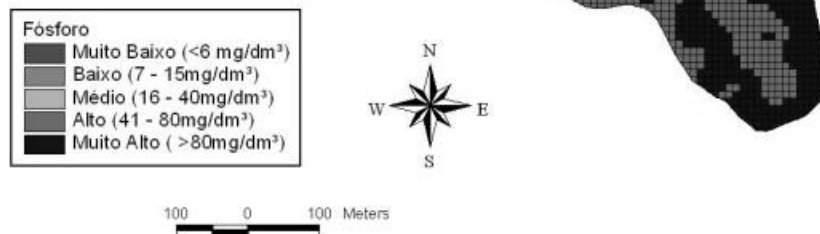


Figura 4 - Ilustração de um mapa de fertilidade do solo, em termos de níveis de fósforo (FUNDAÇÃO ABC, 2003)

Além dos mapas obtidos através de instrumentação das máquinas e implementos agrícolas, e de informações de amostragens no campo, outra fonte muito valiosa de informações são as fotos aéreas.

As fotos áreas feitas com aviões e câmeras especiais são bastante úteis em levantamentos topográficos, pois possibilitam a obtenção desta informação sem a necessidade de ir até a propriedade com um teodolito, uma estação total ou mesmo um GPS, o que sem dúvida economiza muito tempo e pessoal. Existem muitas regiões onde um levantamento aéreo já foi realizado, para estas localidades pode-se solicitar o levantamento dos dados através das fotos já existentes. No entanto, para as localidades não cobertas por esse tipo de trabalho, há a necessidade de se encomendar um levantamento aéreo para a obtenção das fotos, o que ainda é um serviço bastante caro.

Outra possibilidade bem mais barata que as fotos feitas com aviões, são as fotos feitas por satélites. Em função da grande altitude e restrições na qualidade das imagens digitalizadas e enviadas pelos satélites, as suas fotos são menos precisas que as obtidas com aviões, mas atendem a muitos tipos de levantamentos. Através das fotos de satélite, pode-se determinar

dados da cultura, tais como: cobertura vegetal, taxas de fotossíntese, taxas de evapotranspiração, níveis de umidade, dentre outros. A Figura 5 ilustra uma foto de satélite.

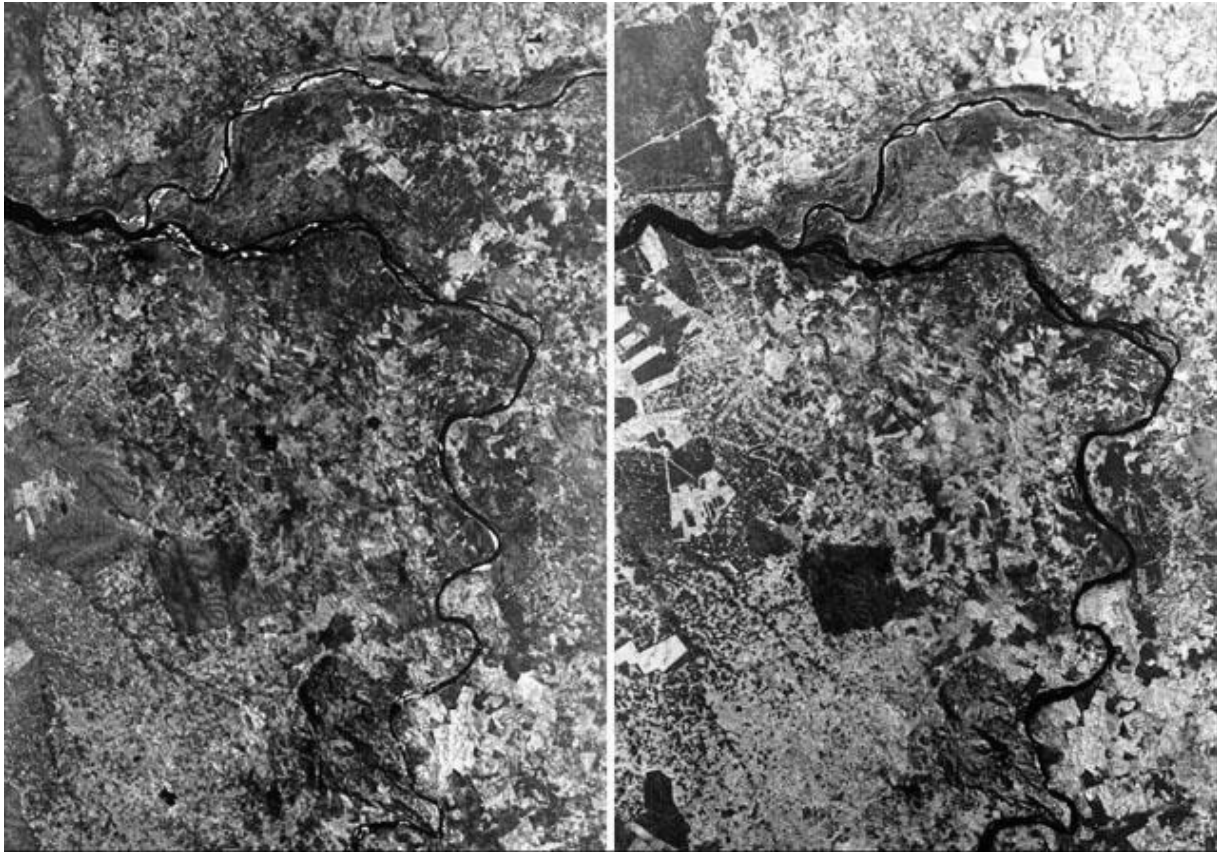


Figura 5 - Fotos da floresta Amazônica na área dos estados de Tocantins, Maranhão e Pará, tiradas pelo satélite Landsat 7. A foto da esquerda foi tirada em agosto de 1995 e a foto da direita foi tirada em maio de 1997 (NASA, 2005)

2.1.4. Sistema de informações geográficas (SIG)

Após o levantamento das informações necessárias a análise do solo e/ou da cultura, ou então de parte destas informações, outro passo seria o de agrupá-las e analisá-las. Devido a grande diversidade de mapas que podem existir descrevendo estas informações torna-se necessária à existência de uma ferramenta capaz de auxiliar nesse trabalho. Para isso utiliza-se o GIS (Geografic Information System), também conhecido como SIG (Sistema de Informações Geográficas), que consiste em um conjunto de *softwares*, operando em um *hardware* relativamente potente, capazes de processar inúmeras informações de forma rápida e

facilitada. Esses sistemas permitem o processamento de um grande volume de informações na forma de mapas e imagens. Essa tecnologia, inicialmente criada para fins militares e agora difundida em diversos setores, possibilita aos profissionais da área agrícola processar o grande volume de dados descritos pelos mapas levantados, e com isso definir o próximo passo, que seria o de interferência sobre as características levantadas.

Em TOSI (2003) pode-se observar que as ferramentas dos SIG possibilitam a implementação de rotinas capazes de efetuar cálculos e cruzar informações, gerando novos mapas. Esses mapas podem ser utilizados para definir as pequenas áreas de manejo uniformes, bem como as recomendações de aplicações de insumos e defensivos, uso de variedades de sementes ou plantas mais adequadas, etc. A Figura 6 ilustra uma operação de interpolação feita em um mapa de produtividade, a qual permite a adaptação destes dados possibilitando o cruzamento com dados topográficos, fotos de satélites, dentre outros.

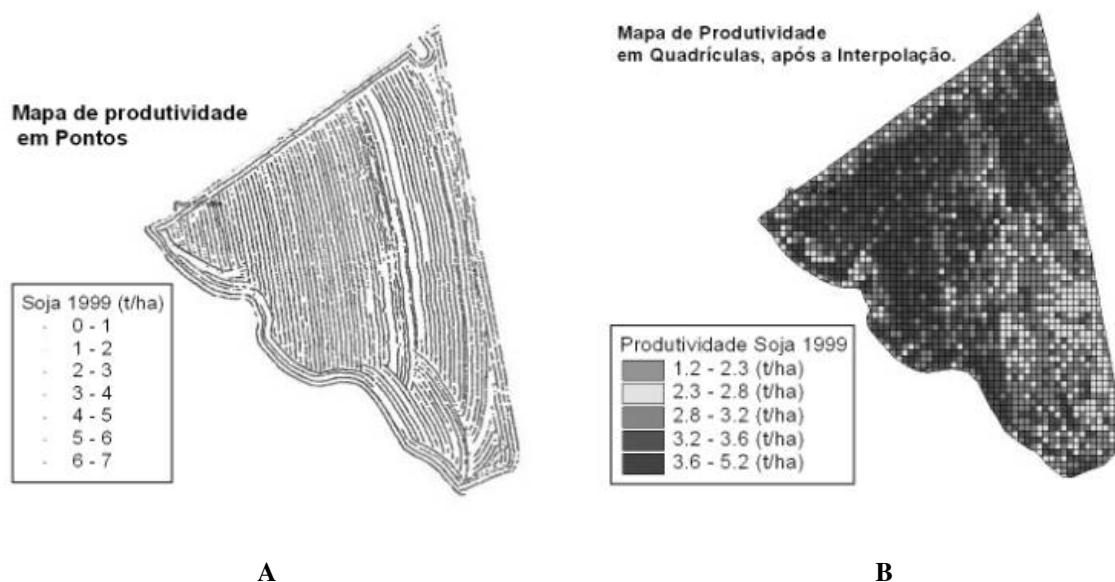


Figura 6 - Ilustração de uma operação de interpolação feita por uma ferramenta SIG. Em A, o mapa de origem. Em B, o mapa obtido pela interpolação (FUNDAÇÃO ABC, 2003)

2.1.5. Manejo da cultura na agricultura de precisão

Até o momento foram observados os diversos passos para a implantação de um sistema de cultivo inserido no conceito da agricultura de precisão. Recapitulando, o passo inicial é a elaboração de um mapa de produtividade, o qual trará informações para o segundo passo, o levantamento de demais informações que expliquem as variações descritas no mapa

de produtividade. Após esse levantamento, as informações de todos os mapas são processadas e analisadas com as ferramentas SIG.

O resultado desta análise servirá para o quarto passo, a interferência nos fatores observados, de modo a otimizar o manejo da cultura. Esse passo pode ser implementado de diferentes formas:

- a primeira forma seria através da subdivisão da cultura em pequenas propriedades virtuais, ou seja, pequenas áreas com manejo, recursos, e objetivos diferentes, o que traz resultados muito melhores que o tratamento homogêneo de toda a área, e é uma alternativa amplamente empregada atualmente;
- a segunda forma requer um nível tecnológico mais elevado, seria com a adoção de equipamentos capazes de operar de forma variável, alterando a sua regulação em função das características do local onde se encontram e um exemplo destes aparelhos são os aplicadores de insumos ou defensivos a taxas variáveis.

O último passo seria o monitoramento georreferenciado dos resultados obtidos na cultura através da adoção de um dos passos anteriores. Deste modo fechando-se o ciclo.

2.1.6. Sistema de posicionamento global (GPS)

O receptor de GPS (Sistema de Posicionamento Global) é um aparelho capaz de fornecer as coordenadas geográficas do local onde se encontra a sua antena receptora.

LOCH & CORDINI (2000) explicam que a partir de 1973, após um longo processo de aperfeiçoamento e definição das necessidades civis e militares, foi implantado o projeto NAVSTAR-GPS (NAVigation System with Time And Ranging - Global Positioning System), uma constelação de 27 satélites orbitando ao redor do globo terrestre. Na configuração atual existem 24 satélites em operação, com mais 3 de reserva, dispostos em 6 planos orbitais com 4 satélites por órbita, defasados de 90° na órbita, sendo o período orbital de 12 horas siderais.

Esse sistema, implantado pelo exército dos Estados Unidos da América, opera os satélites fazendo com que estes enviem informações de sua localização conjuntamente com uma informação precisa da hora, a qual é a mesma em todos os satélites da constelação. O aparelho de GPS é capaz de receber essas informações de localização, e através de um relógio de precisão, medir o tempo de atraso entre o envio do sinal do satélite e a recepção deste pela sua antena, deste modo, calculando a sua distância em relação ao satélite. Segundo LOCH &

CORDINI (2000), a obtenção das coordenadas de localização GPS é feita através de um cálculo de triangulamento, para tanto é necessário que sejam recebidos os sinais de quatro satélites. Apesar do procedimento de cálculo necessitar apenas de três dados de distância, o quarto satélite é requerido para possibilitar o sincronismo do relógio do receptor com o relógio dos satélites. Isso porque a precisão do relógio do receptor é inferior a dos relógios atômicos instalados nos satélites, sendo então essa diferença corrigida sincronizando-se o relógio do receptor de GPS com os relógios dos satélites. Dependendo da sensibilidade e do número de canais de seu receptor de rádio, um GPS pode ser capaz de rastrear mais de nove satélites, dependendo da sua localização. Quanto maior o número de satélites captados, maior será o número de triangulações possíveis de serem calculadas, resultando em uma maior precisão na determinação das coordenadas. A precisão das coordenadas afeta diretamente a precisão das operações envolvendo o uso do GPS, como por exemplo, a obtenção de um mapa de produtividade. Mesmo com a captação de muitos satélites, ainda existem muitas fontes de erro no cálculo das coordenadas, dentre elas, tem-se o efeito de refração da atmosfera, interferências eletromagnéticas e obstáculos naturais entre o GPS e o satélite. Também havia a presença de uma degradação, imposta pelo Departamento de Defesa dos EUA no sinal de transmissão dos satélites desde o conflito do Golfo Pérsico, a qual foi denominada de SA (*Selective Availability*) ou Disponibilidade Seletiva. Em função disto, um GPS podia apresentar erros de até 100m de raio na determinação de suas coordenadas (OSEKI, 1998). Em 2 de maio de 2000 a SA foi desativada por ordem do presidente dos Estados Unidos, sendo que pode ser recolocada e até intensificada em sinais de GPS de áreas geográficas selecionadas pelo governo dos EUA (KENNEDY, 2002).

Com a remoção da SA, os sinais emitidos pelos satélites para o público civil tornou-se 10 vezes mais preciso. No entanto, existem aplicações onde essa precisão ainda não é satisfatória, como em operações de pulverização. Para resolver os problemas de precisão do GPS, desenvolveu-se um sistema conhecido como DGPS (Sistema de Posicionamento Global Diferencial), que consiste no uso de dois receptores de GPS operando conjuntamente. Os aparelhos operam da seguinte forma: um aparelho fica estacionado em um local fixo, de coordenadas conhecidas; enquanto que o outro aparelho continua sendo de uso móvel, marcando as coordenadas de onde se encontra. O receptor de GPS fixo envia um sinal de rádio ao receptor de GPS móvel informando o erro nas informações passadas pelos satélites. Deste

modo, o aparelho móvel corrige o cálculo da sua localização comunicando-se com o aparelho fixo através de um sinal de rádio. Segundo OSEKI (1998) o DGPS pode reduzir o erro para níveis inferiores a 0,3m.

2.1.7. Aplicação de insumos a taxas variáveis

Com o desenvolvimento da tecnologia da eletrônica e das telecomunicações, o desenvolvimento de equipamentos capazes de trabalhar variando as suas regulagens em função das necessidades locais da cultura, teve um salto. Isso possibilitou o desenvolvimento de máquinas semeadoras, e aplicadores de insumos e defensivos, capazes de variar as taxas de aplicação dos produtos durante o seu trabalho.

Através dos sistemas de aplicação a taxas variáveis, torna-se possível tratar cada porção da cultura como sendo uma área diferente. Deste modo, consegue-se atingir os melhores resultados de manejo da cultura possíveis.

Existem duas formas de um sistema de aplicação a taxas variáveis operar. OLIVA (2001) explica que existem os modelos *on-line* e os modelos *off-line*.

Os modelos *on-line* consistem em sistemas dotados de sensores capazes de levantar as características do solo, e demais características que forem julgadas necessárias, durante o próprio processo de aplicação do insumo, fertilizante ou deposição da semente. A grande vantagem destes sistemas é a independência de uma amarração de coordenadas, além da posse de informações extremamente atualizadas, uma vez que a aquisição destas informações é feita segundos antes da própria operação de interferência, ou seja, da aplicação dos produtos. No entanto, a tecnologia de sensores capazes de levantar todas essas informações, e em tempo real, ainda não está suficientemente desenvolvida. Não existem sensores para todos os tipos de análises necessárias. Além disso, um equipamento deste tipo requer um recurso computacional muito rápido e sofisticado, uma vez que o sistema terá apenas alguns segundos para efetuar a tomada de decisão em relação à regulação mais adequada a ser feita.

Segundo o mesmo autor, os modelos *off-line* são os empregados atualmente. Nestes modelos, a aplicação dos produtos é feita seguindo-se um mapa pré-elaborado. Através do emprego de um aparelho GPS ou DGPS, é feita a amarração do mapa de aplicação com a posição onde se encontra a máquina. Este modelo trás como vantagem a existência de um intervalo de tempo entre o levantamento das informações e o processo de aplicação dos

produtos, deste modo, é possível que sejam feitas as análises necessárias. Além disso, a tomada de decisão quanto à quantidade a ser aplicada pode ser feita por um profissional, uma pessoa qualificada, não ficando a cargo somente do sistema computacional embarcado na máquina. Isso possibilita uma análise mais aprimorada, bem como permite que seja levado em consideração o atraso na resposta do mecanismo de aplicação e de todo o restante de sistema, podendo este atraso ser compensado durante a elaboração do mapa de aplicação. Como desvantagens têm-se o erro proveniente das imprecisões do GPS, bem como a variação decorrente do intervalo temporal entre a coleta dos dados, a elaboração do mapa de aplicação e o seu uso pelo sistema de aplicação.

Além dos sistemas de aplicação de insumos a taxas variáveis, existem os sistemas de aplicação a taxas e formulações variáveis. Esses sistemas nada mais são do que a associação de mais de um dispositivo de aplicação a taxas variáveis. Quando se pensa em produtos químicos, ou compostos orgânicos, tais como os diferentes tipos de defensivos que podem ser aplicados simultaneamente, ou as formulações dos fertilizantes definidas pelos diferentes nutrientes que as compõe, pode-se atuar alterando-se as concentrações de seus componentes.

Nos sistemas de formulações variáveis, cada aplicador regula a dosagem de seu componente, sendo que todos os aplicadores operam simultaneamente. Deste modo, a variação na proporção entre os diferentes componentes possibilita a variação na formulação do defensivo ou do fertilizante aplicado, bem como a somatória das vazões de todos os componentes resulta na taxa de aplicação total.

Um exemplo deste tipo de sistema de aplicação pode ser observado em OLIVA et al. (2001), estes autores iniciaram o desenvolvimento de um equipamento para a aplicação de fertilizantes sólidos a taxas e formulações variáveis, a partir da adaptação de uma máquina semeadora e adubadora para plantio direto, já existente no mercado. Este trabalho obteve bons resultados na adaptação do sistema mecânico e hidráulico, mas verificaram diferenças estatísticas significativas nos sistemas dosadores helicoidais, que são os normalmente empregados para fertilizantes sólidos. UMEZU & CAPPELLI (2002) deram continuidade ao desenvolvimento deste equipamento, obtendo bons resultados no projeto e implantação do circuito de controle dos dispositivos dosadores helicoidais, bem como no desenvolvimento do *software* para a leitura do mapa de aplicação a taxas e formulações variáveis. Esse

equipamento possibilita a aplicação de fertilizantes sólidos no sulco, em quatro linhas de cultivo, operando com até três tipos de fertilizantes distintos.

O uso de sistemas de aplicação a taxas variáveis, e a taxas e formulações variáveis, apresenta um grande potencial de aplicação nas propriedades de maior porte, onde o emprego de sistemas de manejo que subdividam a cultura em pequenas áreas uniformes é mais dificultado. Acrescenta-se a isso a maior diluição do custo inicial do sistema, que ainda é caro, possível de ser feita no orçamento das grandes culturas.

2.2. Fertilizantes fluídos

2.2.1. Histórico

A adubação das culturas com fertilizantes fluídos já é coisa bastante antiga. Na Grécia Antiga, por exemplo, os agricultores já se utilizavam dos esgotos das cidades, através de canais, para promover a fertilização de hortas e pomares de laranja (BOARETO et al., 1991).

No início do século XX, a produção de fertilizantes em geral, e de fluídos em particular, foi estimulada pelo desenvolvimento da produção de amônia anidra, através de processos de síntese mais práticos e econômicos (BOARETO et al., 1991).

No Brasil, não se considerando o chorume e a vinhaça, os adubos fluídos começaram a ser usados quase meio século depois de iniciado o seu emprego nos EUA (MALAVOLTA, 1994). A produção comercial brasileira de fertilizantes fluídos iniciou-se na década de 1970, em função da necessidade do país possuir certa auto-suficiência com relação a determinados produtos, dentre os quais insumos agrícolas. Essa necessidade ocorreu em função da crise do petróleo, o que acabou sendo responsável pelo impulso na utilização de fertilizantes no país (YAMADA, citado por BICHARA et al., 1994).

2.2.2. Matérias primas

Existe um grande leque de matérias primas na formulação dos fertilizantes fluídos. No entanto, devido aos problemas de oferta e continuidade no fornecimento destas, apenas uma pequena variedade é empregada para a fabricação no Brasil (BICHARA et al., 1994). A Tabela 1 descreve as matérias primas mais usadas.

Tabela 1 - Matérias primas para a produção de adubos fluidos (MALAVOLTA,1994)

Elemento	Fonte	Teor (%)
Nitrogênio (N)	Amônia anidra	82
	Aquamônia	15-20
	Nitrato de amônio	34
	Uréia	45
	Uran	32
Fósforo(P_2O_5)	Ácido Fosfórico	30-54
	Rocha fosfática	30
Potássio(K_2O)	Cloreto de potássio	60
Cálcio(Ca)	Óxido	60
	Cal hidratada	46
	Calcário	24
Magnésio(Mg)	Óxido	55
	Calcário dolomítico	11
	Sulfato	9
Enxofre	Gesso	16
N- P_2O_5	Fosfato monoamônico	11-48
	Fosfato diamônico	18-46
	Fosfatos de amônio	06-30
		10-30
		11-37
N- K_2O	Nitrato de potássio	13-44
	Salitre potássico	15-14
Boro(B)	Ácido Bórico	17
Cobre(Cu)	Sulfato	25
Manganês(Mn)	Sulfato manganoso	26-28
Molibidênio(Mo)	Molibidatos de sódio e amônio	39 e 45, respectivamente
Zinco(Zn)	Sulfato	23

2.2.3. *Fabricação*

No Brasil, são utilizados dois processos tradicionais de fabricação de soluções ou suspensões: as misturas a quente (*hot mix*) e a frio (*cold mix*). Basicamente eles diferenciam-se pelo fato de liberarem ou não calor durante a elaboração de suas formulações (MALAVOLTA, 1994). No processo de fabricação a quente, o posterior processo de resfriamento dos fluídos, se conduzido sem agitação e de forma lenta, pode ocasionar a formação de cristais com tamanhos e formas heterogêneos, o que resulta em uma maior sedimentação destes cristais, comprometendo a uniformidade da mistura. Logo a planta deste processo requer maiores cuidados em relação às plantas a frio.

2.2.4. *Formulação*

Utilizando-se das informações reunidas por BOARETO et al (1991), MALAVOLTA (1994) elaborou a Tabela 2, a qual dá a composição das formulações comercializadas no Brasil, sendo grande parte suspensões.

Tabela 2 - Principais formulações comercializadas no Brasil (MALAVOLTA, 1994)

Tipo	Composição (%)		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Soluções Nitrogenadas	32	0	0
	20 ¹	0	0
Formulações NP	06	30	0
	10	30	0
Formulações NPK	03	15	10
	03	15	15
	12	04	12
	16	04	16
	12	06	18
	08	04	12
Formulações NK	10	0	15
	12	0	18
	15	0	15
	18	0	18
	20	0	13
	10	0	10
	08	0	12
	16 ²	0	07

¹Pode conter 4% de S.

²Contém micronutrientes.

2.2.5. Vantagens e desvantagens

Conforme MALAVOLTA (1994) as vantagens e desvantagens do uso dos fertilizantes líquidos podem ser avaliadas em relação à questão industrial e a agronômica:

Industrial

Vantagens:

- Facilidade de transporte e manuseio, pois pode ser facilmente bombeado;
- Menor investimento na construção de unidades e menores custos de produção;
- Menor segregação;
- Maior facilidade na adição de micronutrientes;
- Menor poluição do ar e dos cursos de água.

Desvantagens:

- Formação de borras nas soluções e às vezes nas suspensões, devido a impurezas como alumínio, ferro e magnésio;
- Aumento na viscosidade com a redução da temperatura;
- Dificuldade no armazenamento de suspensões;
- Maior dificuldade no preparo de formulações PK do que no caso dos sólidos;
- Dificuldade no suprimento de matérias-primas.

Agronômica

Vantagens:

- Maior uniformidade de aplicação;
- Localização adequada;
- Incorporação de herbicidas, defensivos, micronutrientes;
- Economia de mão-de-obra para aplicação (menos máquinas);
- Redução de perdas de nitrogênio da uréia quando o cloreto de potássio está presente;

Desvantagens:

- Dificuldade no uso de amônia como fonte de N para culturas perenes;
- Dificuldade na obtenção de matéria prima.

2.2.6. Aplicação

A eficiência no uso de fertilizantes está associada à quantidade que se utiliza, e à produtividade que se obtém com o seu emprego. Segundo BITTENCOURT e BEAUCLAIR (1992), para se obter essa eficiência, além da própria natureza dos fertilizantes, os processos de deposição no solo também devem preencher alguns requisitos como:

- alta probabilidade das raízes encontrarem os nutrientes aplicados, já no começo do desenvolvimento do vegetal;
- tanto quanto possível evitar processos de perdas dos nutrientes por lixiviação, volatilização e fixações físico-químicas e biológicas.

Segundo BITTENCOURT e BEAUCLAIR (1992), no Brasil não existem muitos trabalhos que estudem os efeitos da localização dos adubos dentro das culturas. Isto pode, até certo ponto, ser explicado pelo fato da dificuldade que existe em se direcionar o adubo em estado sólido. Já com os fertilizantes fluídos, o direcionamento torna-se relativamente fácil, possibilitando o desenvolvimento de diferentes métodos de deposição. Em função disto, nos EUA, várias metodologias têm sido recomendadas, como as apresentadas a seguir:

- ***Starter fertilizer:*** fertilizante aplicado no plantio, em contato direto ou lateralmente e abaixo da semente;
- ***Strip fertilization:*** o insumo é aplicado em faixas na superfície, e geralmente incorporado;
- ***Surface band:*** colocação do fertilizante na superfície através de um jato forçado, podendo ser incorporado;
- ***Sidressed fertilizer:*** aplicação ao lado das ruas de plantio, geralmente após a emergência do vegetal;
- ***Deep placement:*** colocação do fertilizante abaixo da zona convencional de cultivo, através de facas, subsoladores, etc.
- ***Dribble banding:*** colocação do insumo na superfície do solo em faixas, podendo ou não ser incorporado;
- ***Dual application:*** aplicação simultânea de dois fertilizantes separados em um ponto específico do solo;
- ***Dual placement:*** colocação de dois ou mais fertilizantes separados, em faixas subsuperficiais distintas no solo;

- ***Knifed:*** o fertilizante é colocado no solo através de haste fina e cortante;
- ***Plow-down fertilizer:*** aplicação na superfície do solo antes da aração;
- ***Pop-up fertilizer:*** pequenas quantidades do fertilizante são colocadas em contato direto com a semente.

Conforme BOARETO et al. (1991), na cultura de cana-de-açúcar a aplicação do fertilizante fluído é feita de duas formas:

- Para a cana-planta a solução NPK tem sido realizada no fundo do sulco, em filete contínuo (linha) ou em faixa de ($\pm 0,1\text{m}$), devendo-se promover retorno do solo ao sulco para incorporar o fertilizante a cerca de 0,05m, evitando problemas de volatilização de N;
- Para a cana-soca: a aplicação dos fertilizantes é feita juntamente com a operação do cultivo de soqueira, sendo que, tanto para formulações fluidas de N e K, como para somente N, em áreas com vinhaça, estes devem ser aplicados em profundidade quando a fonte de N é a aquamônia, e de preferência com o solo úmido, podendo ser mais superficial quando se usa uran, uma vez que é menos sujeito a volatilização.

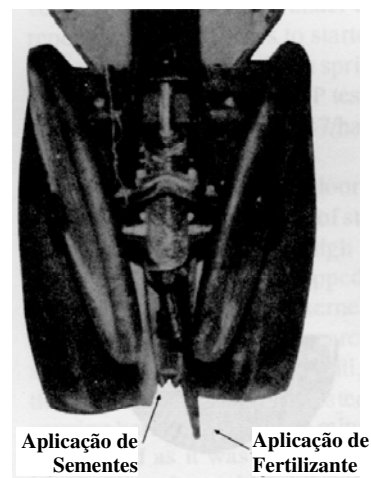
Para as culturas anuais utiliza-se a aplicação em linha, recomendando-se uma profundidade de cobertura de no mínimo 0,5m, para evitar perdas por volatilização de N. A adubação mais utilizada é a nitrogenada, utilizando-se aquamônia, uran ou sulfuran.

Para culturas perenes, a aplicação dos fertilizantes fluidos tem sido utilizada com maior intensidade para café e citrus. O fertilizante pode ser aplicado em área total ou na projeção da copa.

Os sistemas de aplicação podem se apresentar de diferentes formas. A forma mais empregada tem sido o uso de canais condutores (tubos) situados na parte inferior posterior dos elementos de ataque ao solo, tais como discos de corte, sulcadores, facas, aivecas, subsoladores. Esse tipo de instalação permite o aproveitamento das ferramentas já existentes, incluindo-se as empregadas para a aplicação de adubos sólidos. A Figura 7 ilustra um destes sistemas.



A



B

Figura 7 - A) Exemplo do emprego de um aplicador de líquidos incorporado a uma máquina de plantio. B) Detalhe do dispositivo (FIXEN, 1994)

BAUTISTA et al. (2001) descreveram uma série de sistemas para uso manual ou movido à tração humana, baseados no conceito de aplicação pontual, para o uso na aplicação de N em culturas de arroz. A Figura 8 ilustra um dos sistemas descritos pelos autores.



Figura 8 - Sistema para a aplicação pontual de nitrogênio fluído (BAUTISTA et al., 2001)

A simplicidade dos dispositivos de aplicação de fluídos possibilita o seu fácil emprego em equipamentos comerciais, pois basicamente se constituem de uma mangueira e um bocal de deposição no solo. A Figura 9 ilustra um dispositivo de aplicação de fertilizantes líquidos em camada sub-superficial, modelo Maverik, produzido pela Yetter Farm Equipment, empregado em máquinas de plantio direto. Entre os discos observa-se o sulcador com o dispositivo de aplicação de fertilizante líquido na sua parte traseira. Já a Figura 10 ilustra um dispositivo alternativo, onde a aplicação do fertilizante líquido é feita por uma haste flexível que o deposita nas paredes laterais de um sulco.



Figura 9 - Dispositivo de aplicação de fertilizante líquido no solo em camada sub-superficial, para plantio direto (YETTER FARM PRODUCTS, 2003)



A



B

Figura 10 - A) Dispositivo de aplicação de fertilizante líquido no solo utilizando haste flexível. B) Detalhe da haste flexível (BRAGACHINI et al., 2001)

2.3. Atuação dos fertilizantes líquidos aplicados no solo

2.3.1. Dinâmica do nitrogênio no solo

Conforme descrito por TRIVELIN et al. (1994) há controvérsias quanto ao aproveitamento do nitrogênio dos fertilizantes líquidos (líquidos e gasosos) pelas culturas, perdas por volatilização, lixiviação e desnitrificação, bem como o efeito residual e distribuição do nutriente no perfil do solo. No entanto, poucos estudos foram desenvolvidos no Brasil visando obter respostas para estas perguntas. No trabalho realizado pelos autores, foram descritos diferentes trabalhos de pesquisa cujo objetivo era o de avaliar o aproveitamento do N dos fertilizantes líquidos comparativamente aos sólidos. Em todos os trabalhos constatou-se que não existe diferença entre se empregar um ou outro, já que as mesmas dosagens de N por área, resultavam nos mesmos rendimentos. Vale lembrar que estes trabalhos foram realizados tendo como base a cultura da cana-de-açúcar.

Em relação à lixiviação e a mobilidade do N no solo, no trabalho de TRIVELIN et al. (1994) descreve-se um estudo efetuado pelos mesmos autores em 1985, no qual avaliou-se, pela técnica isotópica, o comportamento do N da uréia ^{15}N e da aquamônia ^{15}N , aplicadas ao solo em sulcos de aproximadamente 20cm de profundidade e laterais às linhas de cana. Retirados após três meses, constatou-se que ocorreram diferentes tendências. Essas mostraram um fator favorável ao uso dos líquidos. O N da aquamônia permaneceu mais na superfície do solo, enquanto que o N da uréia foi encontrado nas camadas mais profundas, pois sofreu maior lixiviação. Um outro trabalho realizado pelos mesmos autores em 1988 também demonstrou estes resultados e, além disso, também evidenciou um movimento lateral, o que possibilita a aplicação do fertilizante na entrelinha da cana-de-açúcar em lugar de duas linhas localizadas próximas a linha de plantio. Isto trouxe como vantagem a redução de danos no sistema radicular, uma vez que o cultivo é realizado a uma distância maior da linha de cana. Um outro trabalho realizado em 1988, também pelos mesmos autores, evidenciou uma mobilidade similar do N, agora em solos arenosos. Neste trabalho, observou-se uma perda de N por lixiviação quatro vezes menor na aquamônia em relação à uréia.

Uma forma importante de perda de N e conseqüente redução na eficiência do fertilizante é a perda por volatilização de amônia. A amônia aparece no solo devido à decomposição de matéria orgânica nativa, restos culturais, carcaças de animais e excrementos.

Uma forma artificial de reposição de N decorre da aplicação de fertilizantes nitrogenados amoniacais ou amídicos. Quando no solo, o nitrogênio apresenta-se na forma de um equilíbrio químico entre o amônio (NH_4^+) e amônia (NH_3). O qual pode ser expresso pela Equação (1).



Quando se eleva o pH do solo, desloca-se o equilíbrio para a direita, elevando a concentração relativa de amônia, e conseqüentemente, as perdas por volatilização. O transporte da amônia para a superfície ocorre principalmente por fluxo de massa juntamente com a água que evapora.

Dentre os principais fatores que afetam o processo de volatilização de amônia, pode-se citar as características do solo, as condições ambientais e as condições de manejo.

Além do pH, a CTC (Capacidade de Troca Catiônica) é uma característica do solo que apresenta grande importância na sua retenção da amônia. TRIVELIN et al. (1994) descrevem que em trabalhos realizados por VOLK (1959) e por GASSER, (1964) mostraram-se perdas de 17 a 59% do N aplicado em solo com CTC menor que 8meq/100g, e perdas desprezíveis para valores maiores que 11meq/100g.

Em relação às condições ambientais, o aumento da temperatura também contribui para o aumento das perdas por volatilização. Com a elevação da temperatura, além se deslocar a reação apresentada na Equação (1) para a direita, ocorre a redução da solubilidade da amônia, o que aumenta as perdas por difusão favorecendo a volatilização. A perda de amônia do solo também está relacionada com o teor de umidade atual do solo e sua alternância de umedecimento e secamento posterior a aplicação do fertilizante nitrogenado, bem como com a umidade relativa do ar, uma vez que essa interfere no potencial de evaporação da água presente no solo e na volatilização da amônia. No campo, geralmente associa-se períodos de maior temperatura e secamento do solo com altas taxas de perda de amônia. No entanto, as perdas totais acumuladas em um determinado período são maiores quando o solo permanece úmido e a água evapora lentamente, havendo chuvas escassas.

As condições de manejo, se bem exploradas podem reduzir consideravelmente as perdas por volatilização. Por exemplo, em solos ácidos, a perda de N quando se utiliza uréia é maior do que quando se utiliza o Ureá ou o sulfato de amônio. De modo geral, a aplicação em

profundidade do fertilizante, com recobrimento do solo logo em seguida, reduz consideravelmente as perdas de N. No que se refere ao efeito da cobertura vegetal nas perdas por volatilização da amônia, TRIVELIN et al. (1994) explica que, conforme o caso, esta condição favorece ou diminui as perdas.

2.3.2. Dinâmica do fósforo no solo

No que se refere ao comportamento do fósforo no solo, este não difere se o mesmo provém de fertilizantes sólidos ou líquidos. O grande problema quanto ao rendimento da adubação fosfatada reside no fato deste elemento reagir com componentes do solo transformando-se em novos compostos de menor mobilidade. Quando disposto no solo, o fertilizante sólido sofre dissolução pela água que está presente. Após isso, uma fração deste fertilizante é lixiviada pela água de drenagem e outra é transformada em formas lábil e não lábil. Apenas uma pequena fração é absorvida diretamente pela planta. Tal comportamento caracteriza um baixo aproveitamento do fósforo presente no solo pelas culturas. Conforme observado em SCIVITTARO et al. (1994) a recuperação do fósforo aplicado, feita pelas plantas, não ultrapassa os 20% nas melhores situações.

No que se refere ao desempenho dos fertilizantes líquidos em relação aos sólidos, o mesmo autor, avaliando diferentes trabalhos, verifica que a quantidade de fósforo absorvida pelas plantas, em ambas as formas, é semelhante. No entanto, ele ressalta que existem situações em que os fertilizantes líquidos apresentam visíveis vantagens em relação aos sólidos, principalmente no que se refere ao teor de fósforo solúvel em água. Isso se deve ao fato das soluções fertilizantes apresentarem maior solubilidade que determinadas fontes sólidas. Entretanto esses fertilizantes acabam tornando-se menos disponíveis com o tempo, devido à conversão do fósforo em formas menos disponíveis. Mas, ainda assim, a absorção é maior em fertilizantes com elevada solubilidade em água.

Os mesmos autores também afirmam que, em função da quantidade de fósforo presente em solução no solo ser pequena, as perdas por lixiviação geralmente são insignificantes. Restam alguns casos particulares, onde essas perdas podem se tornar maiores. Isso pode ocorrer em solos extremamente arenosos, com baixos teores de alumínio, ferro, cálcio ou magnésio, ou em solos orgânicos com poucos cátions adsorvidos e pH baixo. Nesta situação, a baixa capacidade de retenção de água do solo associa-se a maior disponibilidade de

fósforo em solução, uma vez que a presença dos elementos descritos anteriormente age favorecendo a retenção de fósforo nos solos. Solos fortemente adubados também são mais susceptíveis a perdas por lixiviação.

2.3.3. Dinâmica do potássio no solo

Segundo RAIJ & QUAGGIO (1996) o potássio geralmente é o segundo elemento extraído em maior quantidade pelas plantas. O potássio trocável representa a fração do elemento que é absorvida pelas plantas, no entanto, formas não trocáveis também podem contribuir para o fornecimento em curto prazo do nutriente.

O mesmo autor, também explica que o potássio presente nos tecidos vegetais não é incorporado a fração orgânica, permanecendo como íon. Logo, parte do potássio consumido pelos vegetais é reciclado através do material restante no solo após a colheita. O K presente neste material pode voltar rapidamente ao solo em forma prontamente disponível.

Os fertilizantes potássicos mais comuns apresentam-se nas formas de cloreto de potássio, sulfatos e nitratos, todas solúveis em água. Percebe-se então o emprego das mesmas matérias primas tanto em fertilizantes sólidos como em líquidos. Deste modo, não existem diferenças entre os sólidos e os líquidos, em termos do aproveitamento destes pelas plantas. A grande diferença decorre do fato dos fertilizantes líquidos se encontrarem mais prontamente disponíveis para as plantas, uma vez que os sólidos ainda precisam ser dissolvidos para então serem consumidos pelos vegetais.

Em solos mais arenosos, grandes quantidades do fertilizante podem promover perdas por lixiviação, este fato limita a quantidade máxima a ser aplicada em uma única operação. RAIJ & QUAGGIO (1996) recomenda que não se exceda os 60kg.ha^{-1} .

2.4. Sistemas de aplicação

Os sistemas de aplicação de fertilizantes fluídos a taxas variáveis baseiam-se nos mesmos elementos dos sistemas tradicionais, acrescentando-se da existência de um controlador eletrônico responsável por regular a vazão de fertilizante em função de um sinal de controle externo. A Figura 11 ilustra o diagrama em blocos básico deste sistema.

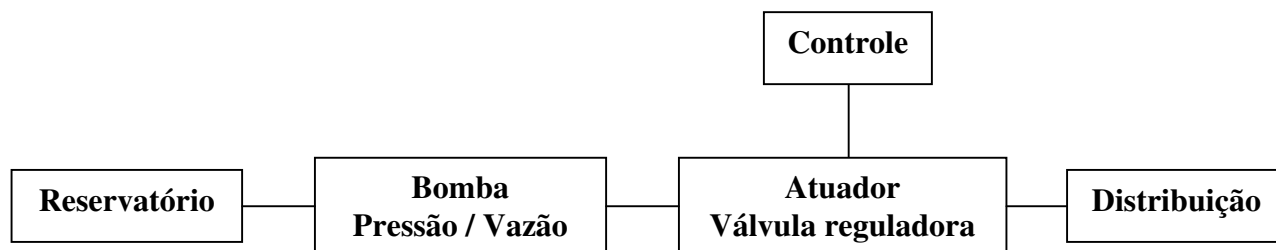


Figura 11 - Diagrama em blocos básico de um sistema de aplicação de fertilizantes líquidos a taxas variáveis

2.4.1. Reservatório

Quanto aos reservatórios, conforme observado nos trabalhos de ARAÚJO FILHO (1994), BOARETO (1991) e PICCIN (1994), estes podem ser instalados em diferentes locais, o que representa uma vantagem em relação aos adubos sólidos. Os locais mais usuais são os também usados pelos sistemas de pulverização, ou seja, acoplado a barra porta-ferramentas do trator ou em uma carreta tracionada. A primeira opção é bastante prática, pois já aproveita a estrutura de chassi do próprio trator, barateando o seu custo, mas a sua capacidade fica restrita a capacidade de levantamento do sistema hidráulico do trator o que representa cerca de 800L para os modelos de até 107kW. A segunda opção é o uso de uma carreta tracionada pelo trator, neste caso a capacidade de carga poderia atingir 1600L. A Figura 12 e Figura 13 ilustram cada um destes casos.



Figura 12 - Reservatório acoplado a barra porta-ferramentas do trator (SPRAYING SYSTEMS, 2004)

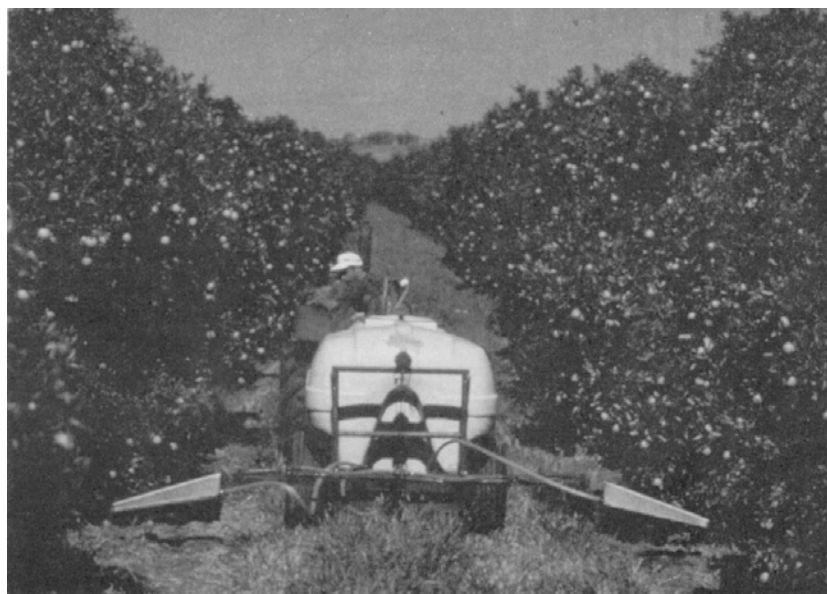


Figura 13 - Reservatório disposto em uma carreta tracionada (ARAÚJO FILHO, 1994)

Além das opções usuais da pulverização, existem outras específicas para a aplicação de fertilizantes líquidos. A primeira seria a utilização de reservatórios localizados na parte lateral do trator, sendo um ou dois de cada lado. Nesta configuração, há a necessidade de uma estrutura auxiliar para a sustentação destes reservatórios, mas trás como vantagens a disponibilização da barra porta-ferramentas, além do aumento da capacidade para até 1600L em tratores usualmente empregados na sulcação e no cultivo de cana, ou seja, de 74 a 88kW (BOARETO et al., 1991). A Figura 14 ilustra esse tipo de reservatório.



Figura 14 - Reservatório localizado na parte lateral do trator (ARAÚJO FILHO, 1994)

A segunda seria a utilização reservatórios em aplicadores autopropelidos. Esta opção não se utiliza de um trator, mas geralmente de um caminhão, com reservatório e sistema de aplicação instalados. Esta opção apresenta elevada capacidade de armazenamento, podendo exceder 19000L. A Figura 15 ilustra esse caso.



Figura 15 - Sistema autopropelido, onde um caminhão é adaptado para receber um reservatório de alta capacidade mais o sistema de aplicação (SPRAYING SYSTEMS, 2004)

O material dos tanques pode ser de aço carbono revestido com tintas anticorrosivas, aço inoxidável, aço naval, polietileno ou fibra de vidro.

Nos fertilizantes líquidos é comum ocorrerem problemas de desuniformidade, e decantação dos cristais presentes, principalmente quando se tratam de suspensões, que também podem apresentar problemas de segregação. Em função disto, há a necessidade de se efetuar a agitação do fertilizante presente no reservatório. Existem diferentes possibilidades de se efetuar essa agitação, que pode ser através dos sistemas pneumático, hidráulico ou mecânico. Conforme BOARETO et al. (1991) o sistema pneumático opera borbulhando ar comprimido no interior do reservatório para manter a homogeneização da suspensão. Para tanto o sistema é dotado de um compressor e uma tubulação a qual distribui o ar em toda a extensão do reservatório. Com o mesmo objetivo o sistema mecânico opera através de pás ou hélices que se movimentam no interior do reservatório. O sistema hidráulico opera de forma similar ao sistema pneumático, com a diferença fundamental de recircular o próprio fertilizante presente no reservatório. Uma outra forma de se efetuar a movimentação da massa fluída de fertilizante é através de um sistema de agitação hidromecânica. Esse sistema, proposto por PERTICARRARI & BRAUNBECK (1986), possui um eixo tubular, dotado de bicos ejetores-propulsores, dispostos longitudinalmente no centro do tanque e apoiado sobre mancais. Acionado por uma bomba centrífuga, o sistema efetua a agitação hidráulica através da recirculação do fluido, além disso, os jatos dos bicos impulsionam o eixo tubular fazendo com que este gire conjuntamente com os bicos. Deste modo, os bicos deslocam-se radialmente pelo reservatório proporcionando uma maior homogeneização. A Figura 16 ilustra o sistema.

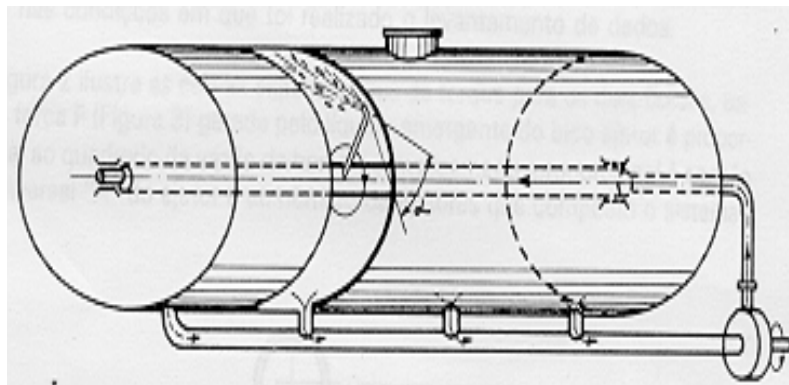


Figura 16 - Ilustração do sistema de agitação hidromecânica (PERTICARRARI & BRAUNBECK, 1986)

2.4.2. Bombas

Os aplicadores podem operar com diferentes tipos de bombas, tais como: centrífuga, peristáltica, de pistão ou de engrenagens, sendo as duas primeiras as mais empregadas.

O emprego de bomba centrífuga pode ser implementado utilizando-se a tomada de potência do trator ou um motor externo para o seu acionamento. Inicialmente empregaram-se as bombas usadas na distribuição de herbicidas e inseticidas, no entanto, as características dessas aplicações são diferentes no que tange a pressão, volume e tipo de produto. Diferente da aplicação de defensivos, que envolve pequenas vazões aplicadas à elevada pressão, para que se processe a manutenção de uma pulverização com gotas pequenas e bem distribuídas, a aplicação de fertilizantes líquidos envolve vazões maiores, mas que operam a baixas pressões, pois basta injetá-los no solo (BOARETO et al., 1991). Neste sistema a pressão é mantida pela bomba centrífuga, que opera a velocidade constante. O controle do volume aplicado por metro deve ser feito por intermédio de uma ou mais válvulas, que variem a vazão fornecida aos bicos aplicadores em função da velocidade de deslocamento do trator (ou do implemento) e da taxa de aplicação fornecida ao controlador. Uma vantagem desta bomba é que a vazão adicional de fluido, fornecida pela bomba, a qual não é utilizada na aplicação, é devolvida ao reservatório proporcionando a movimentação hidráulica da massa de fertilizante no mesmo, dispensando a necessidade de um sistema de agitação independente. A Figura 17 mostra o diagrama de um sistema de aplicação com bomba centrífuga.

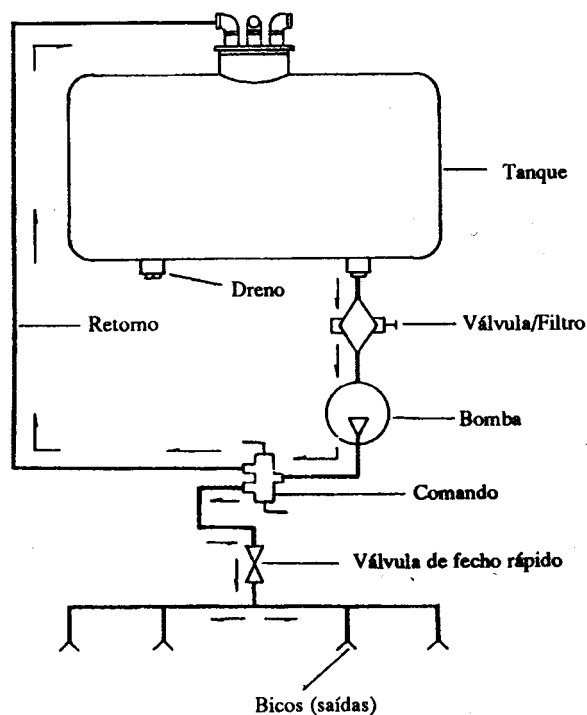


Figura 17 - Diagrama de um sistema de aplicação de fertilizantes líquidos utilizando uma bomba centrífuga (BOARETO et al., 1991)

O uso de fertilizantes líquidos em suspensão trás como complicante a presença de cristais em suspensão que apresentem efeito abrasivo e corrosivo no rotor eixo e selo mecânico da bomba. Para evitar que este efeito comprometa o funcionamento da bomba, torna-se necessário o emprego de uma bomba específica para este tipo de aplicação (BOARETO et. al., 1991). Uma opção é a adoção de bomba com alma de aço inoxidável, ou então com superfícies internas feitas de metal duro, mais resistente à abrasão e corrosão.

O aplicador com bomba peristáltica teve o seu uso incrementado nos EUA a partir da década de 1940, pela Estação Experimental do Tennessee (BOARETO et al., 1991). Os componentes básicos deste tipo de bomba são, o carretel com os roletes, e os tubos ou mangueiras. A Figura 18 ilustra um exemplo deste tipo de bomba.

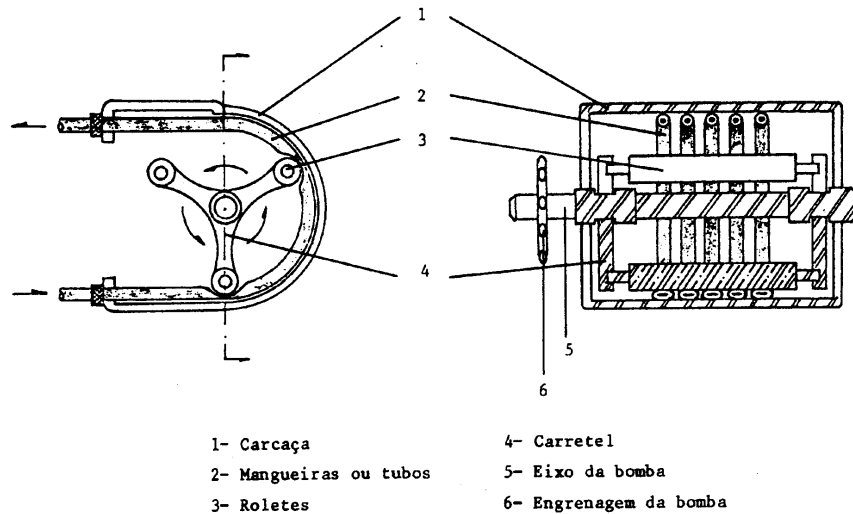


Figura 18 - Ilustração de uma bomba peristáltica (BOARETO et al., 1991)

O movimento circular giratório faz com que os roletes pressionem as mangueiras, forçando a transferência de um dado volume de produto, sendo então uma bomba de transferência de volume de baixa pressão. Esse tipo de bomba adapta-se bem ao uso em aplicação de fertilizantes líquidos, pois estes não necessitam de elevada pressão. A grande vantagem desse sistema é a possibilidade de ser acionado diretamente pela roda do trator ou do implemento, permitindo o controle direto da vazão aplicada por metro em função da velocidade de deslocamento do implemento. No que se refere à aplicação de fertilizantes a taxas variáveis, esta possibilita um controle efetivo da taxa de aplicação simplesmente variando-se a rotação da bomba, sem a necessidade de válvulas para este fim. As mangueiras ou tubos são os elementos vitais desse tipo de bomba, requerendo muita atenção. Um dos pontos principais para a manutenção da regularidade da vazão nas saídas são o tamanho, o diâmetro e a composição das mangueiras, que deverá permanecer constante, ou ao menos bem controlada, entre uma troca e outra e para cada uma das bombas, ou para as diferentes saídas quando se tratar de uma bomba com mais de um estágio, ou seja, mais de um tubo, como é o caso da bomba ilustrada na Figura 18.

Outra vantagem da bomba peristáltica reside no fato das suas partes metálicas não entrarem em contato com o fertilizante. O único elemento em contato com o líquido é a mangueira. Esta desloca o fluido através da movimentação de um conjunto de roletes. Essa movimentação se faz estrangulando a mangueira. Esse estrangulamento traz como

consequência negativa uma grande exigência mecânica da mangueira. Em função disto, a sua vida útil não é muito grande, ficando restrita a algo entre 2000 e 4000 ciclos, segundo MCGUIRE (1990). Em trabalho realizado por LEDEBUHR (2000) visando obter uma bomba específica para a aplicação de fertilizantes fluídos, relata-se um modelo onde a substituição da mangueira pode ser feita em menos de 2 minutos. Essa mesma bomba opera com vida útil de mangueira entre 300 e 600 horas, para as de poliuretano, podendo atingir 1000 horas através do emprego de uma mangueira especial de teflon, porém o seu custo é elevado.

Pode-se observar então, que uma grande limitação da bomba peristáltica reside na vida útil relativamente curta de sua mangueira, o que acaba sendo agravado pela presença de cristais nas suspensões de fertilizantes líquidos, que atuam como abrasivos agredindo a parede interna da mangueira e conseqüentemente reduzindo a sua já pequena vida útil. Outro problema é a não manutenção da forma da seção transversal da mangueira, que com o uso torna-se elíptica, alterando a calibração da bomba e conseqüentemente interferindo na precisão do volume aplicado.

Existem sistemas mistos, onde ocorre a diluição dos elementos químicos nutrientes em uma linha de água. Nestes sistemas, a bomba centrífuga efetua o bombeamento da água, que se encontra em um reservatório separado, enquanto que os nutrientes são inseridos ao fluxo de água, após a bomba, através de um diluidor. O controle da dosagem dos nutrientes é feito através de bombas dosadoras, que podem ser peristálticas (ULSON, 2002). Esse sistema mostra-se bastante útil quando se deseja a aplicação dos fertilizantes em formas mais diluídas, pois poupa a bomba centrífuga do efeito abrasivo dos fertilizantes. No entanto, todo volume de água empregado acaba acrescentando peso ao sistema, uma vez que as opções anteriores permitem a aplicação dos fertilizantes no solo diretamente na sua forma concentrada. Além disso, emprega um número maior de bombas e reservatórios, elevando o seu custo.

Outras opções seriam as bombas de engrenagens e de pistões. Destas, a de pistões foi a que chegou a ser testada (BOARETO et al., 1991). Assim como a bomba peristáltica a bomba de pistão possibilita a variação da taxa aplicada em função da velocidade de rotação do seu eixo, sem a necessidade de válvulas. Mas, no entanto, apresenta uma elevada complexidade mecânica, problemas com fertilizantes abrasivos, e requer um pulmão de ar para a atenuação do efeito da pulsação de fluxo, o que eleva demasiadamente o seu custo.

As bombas do tipo de diafragma não foram mencionadas pelos autores, porém, é de se esperar que tenham limitações semelhantes às de pistão no que diz respeito à pulsação.

2.4.3. Válvulas e distribuição

Dependendo do tipo de bomba empregado há a necessidade de um controle externo da vazão aplicada. É o caso das bombas centrífugas. Neste sistema a vazão proporcionada pela bomba é bem superior à aplicada no solo, sendo o excedente retornado ao reservatório, configurando um *bypass*. O controle da vazão aplicada ao solo é feito por intermédio de válvulas, como pôde ser exemplificado pela Figura 17.

MACYNTYRE (1997) define que em relação a sua aplicação as válvulas podem ser classificadas em de manobra, automáticas, ou de regulação.

As válvulas de manobra são responsáveis por efetuar apenas operações de abertura e fechamento. Enquadram-se nessa classificação os registros de gavetas, as válvulas de esferas e as válvulas de macho.

As válvulas automáticas são normalmente operadas utilizando o próprio fluido de trabalho como fonte de energia. Enquadram-se nesta classificação as válvulas de segurança, de retenção e de controle de pressão, tanto a montante quanto a jusante.

As válvulas de regulação permitem um eficiente controle do escoamento, graças ao “estrangulamento” que provocam. Enquadram-se nesta classificação as válvulas de globo, diafragma e borboleta.

Existem diferentes tipos de válvulas de globo. Segundo NETO & CARDOSO (1999) as válvulas globo podem ser de sede simples, sede dupla, 3 vias ou de gaiola.

A Figura 19 mostra três montagens da denominada válvula globo tipo sede simples.

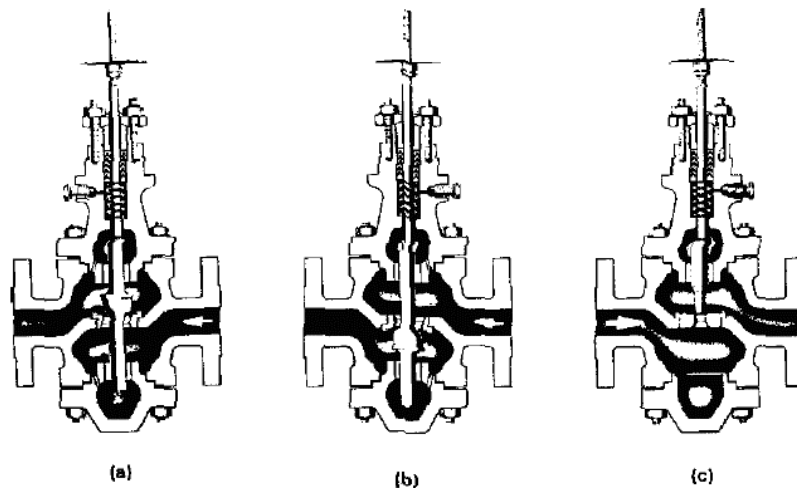


Figura 19 - Válvula globo convencional tipo sede simples. (a) O obturador é guiado duplamente e desce para cortar o fluxo. (b) O obturador é guiado duplamente e desce para liberar o fluxo. (c) O obturador é guiado apenas na parte superior e desce para cortar o fluxo (NETO & CARDOSO, 1999)

Nas válvulas da Figura 19-a e Figura 19-b o obturador é guiado duplamente, isto é, na parte superior e inferior. Neste tipo de válvula o fechamento pode ocorrer movimentando-se o obturador para cima ou para baixo, dependendo da forma como é construída. Na válvula da Figura 19-c o obturador é guiado apenas na parte superior e ao descer a válvula só pode fechar, trata-se de uma válvula mais simples construtivamente. As principais características deste tipo de válvula é que proporcionam uma boa vedação e que possuem um obturador estaticamente não balanceado.

A Figura 20 mostra duas montagens da válvula de sede dupla. Neste tipo o fluxo ocorre através de duas passagens ou orifícios.

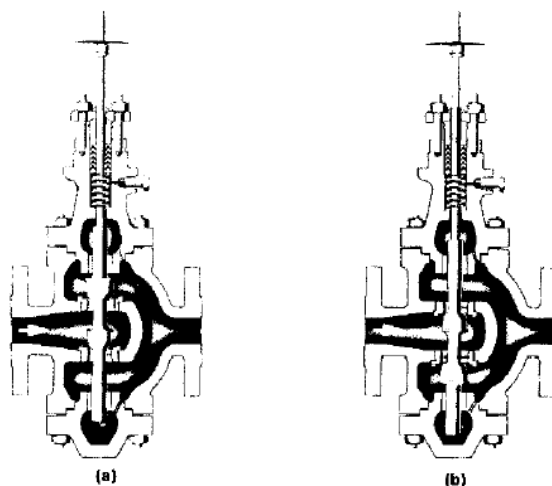


Figura 20 - Válvula globo convencional tipo sede dupla. (a) O obturador desce para cortar o fluxo. (b) O obturador desce para liberar o fluxo (NETO & CARDOSO, 1999)

As duas válvulas podem ser guiadas duplamente, sendo que na válvula da Figura 20-a o obturador desce para fechar, enquanto que na válvula da Figura 20-b o obturador desce para abrir. A principal vantagem da sede dupla em relação da simples está no fato dela ser estaticamente quase estável, ou balanceada, fazendo com que precise de uma força de atuação inferior para ser operada. Como desvantagem este tipo de obturador apresenta um vazamento interno, no fechamento da válvula, superior aos dos modelos de sede simples.

As válvulas globo de três vias são uma adaptação das válvulas globo convencionais, para a utilização em aplicações de mistura ou separação de fluídos.

As válvulas globo tipo gaiola apresentam uma concepção de internos substancialmente diferente da globo convencional. Conforme descrito por NETO & CARDOSO (1999) trata-se de uma concepção antiga que foi totalmente renovada e aperfeiçoada, proporcionando-lhe uma contínua e crescente utilização no setor industrial. Este tipo de válvulas traz como vantagens: facilidade de remoção das partes internas, pela ausência de roscas o que facilita bastante a manutenção na própria instalação; alta estabilidade de operação proporcionada pelo obturador em gaiola, desta forma obtendo uma área de guia 30% superior a obtida pelas guias superior e inferior da válvula convencional; capacidade de vazão da ordem de 20 a 30% maior; menor peso das partes internas, que resulta em uma frequência natural maior, e um menor ruído de origem mecânica em relação às válvulas globo duplamente guiadas.

A Figura 21 mostra uma válvula globo tipo gaiola balanceada, sendo que a característica construtiva da válvula não-balanceada é basicamente a mesma. A diferença está no obturador que é balanceado dinamicamente através a um orifício no seu interior, fazendo com que a pressão do fluido se comunique com ambos os lados do obturador. Assim como acontece nas válvulas globo convencionais o modelo balanceado apresenta um vazamento superior ao modelo não-balanceado. Segundo NETO & CARDOSO (1999) a vedação pode ser melhorada utilizando-se um assento resiliente.

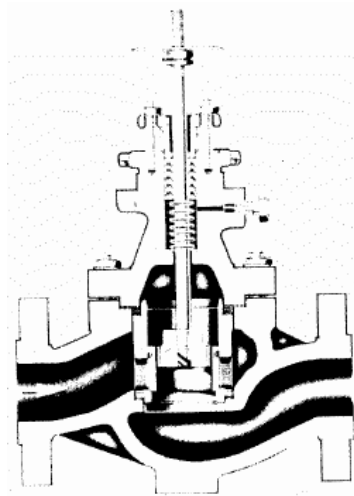


Figura 21 - Válvula globo tipo gaiola balanceada (NETO & CARDOSO, 1999)

MACYNTYRE (1997) e THE BRITISH VALVE MANUFACTURERS' ASSOCIATION (1964) descrevem um modelo de válvula globo denominado de válvula de agulha (*niddle valve*). Trate-se um uma válvula globo de sede simples, onde o obturador é guiado apenas na parte superior. A Figura 22 ilustra uma válvula onde a haste e o obturador são formados por uma única peça. O obturador apresenta uma forma afilada, razão pela qual recebeu a denominação de válvula de agulha. Estes modelos prestam-se a regulação fina do fluxo descarregado e também trazem como vantagem uma relativa simplicidade mecânica bem como reduzido número de componentes.

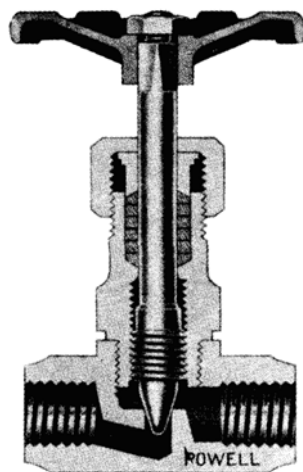


Figura 22 - Ilustração de uma válvula globo com obturador cônico, denominada de válvula de agulha (MACYNTYRE, 1997)

MACYNTYRE (1997) explica que as válvulas de diafragma são muito utilizadas em instalações de ar comprimido e gases. Elas também aplicam-se em instalações com líquidos e gases caros, ou muito corrosivos e perigosos, de modo que não podem vazar pelas vedações da válvula. É também especificada em instalações frigoríficas. A passagem do fluido pela válvula se faz no interior de um tubo, denominado de diafragma, feito de material flexível, borracha, Neoprene, Hypalon, dentre outros polímeros. Não há qualquer contato do fluido com qualquer parte metálica da válvula. O diafragma é a peça que garante a estanqueidade e participa da vedação e regulação.

As válvulas borboleta possuem um disco giratório biconvexo no interior de uma cavidade esférica. Conforme o ângulo deste disco em relação à seção transversal da cavidade este pode possibilitar um fechamento estanque ou uma ampla passagem de água ou então uma graduação intermediária. Esta válvula aplica-se a operações de manobra e regulação. THE BRITISH VALVE MANUFACTURERS' ASSOCIATION (1964) aponta como vantagens destas válvulas: fácil aplicação; dimensões relativamente reduzidas; baixa perda de carga (quanto totalmente aberta); bom controle; e ausência de elementos deslizantes. No entanto, NETO & CARDOSO (1999) explicam que quando a válvula está parcialmente aberta surge um desequilíbrio entre as duas metades do disco, provocado por uma força resultante do efeito da distribuição desigual da pressão do fluido sobre disco. Esta força gera um momento torsor sobre o eixo de giro do disco que tende a fechar a válvula, o que limita a pressão diferencial operada pela válvula. Os autores recomendam restringir a utilização deste tipo de válvula para

controle cursos de 0 a 60°, de modo a se utilizar atuadores de tamanho normal. A Figura 23 ilustra uma válvula deste tipo.

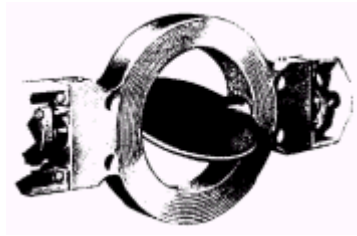


Figura 23 - Ilustração de uma válvula borboleta (NETO & CARDOSO, 1999)

Nos sistemas de aplicação a taxas variáveis as válvulas são operadas eletricamente por meio de um controlador eletrônico. A forma com que estas válvulas operam pode variar. O modelo tradicionalmente empregado opera com válvulas proporcionais, que alteram a vazão alterando a sua perda de carga, ou seja, alterando a sua área de abertura. Nestas válvulas proporcionais, tradicionalmente a abertura e o fechamento são feitos através de um motor elétrico ligado a uma redução mecânica, denominado de *drive* de acionamento da válvula.

Uma alternativa mais recente adota o uso de válvulas do tipo solenóide, restritas a operarem em apenas em duas situações, totalmente aberta ou totalmente fechada, não existindo uma posição intermediária. A abertura e o fechamento são realizados por uma bobina elétrica, um solenóide, que desloca uma agulha, uma membrana ou um diafragma, o qual obstrui ou não o orifício de passagem do líquido. Essas válvulas são especialmente desenvolvidas para operar abrindo e fechando diversas vezes em um pequeno intervalo de tempo. O controle da vazão se dá através do controle da proporção entre o tempo que a válvula permanece aberta e o tempo em que a válvula permanece fechada, sendo que esse controle é feito por um circuito eletrônico dedicado, conhecido como amplificador PWM (Pulse Wave Modulation). Empregados no controle da injeção de combustível nos motores com injeção eletrônica, os amplificadores PWM vêm ganhando espaço, pois consomem menos energia e vêm tornando-se cada vez mais precisos e baratos.

Uma outra possibilidade amplamente empregada para a aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis consiste no controle da rotação dos distribuidores. Neste caso utiliza-se de um circuito hidráulico onde o controle da rotação é feito variando-se o fluxo de óleo nos motores hidráulicos. Esse controle é feito por meio de uma válvula reguladora de fluxo, onde

quem faz o acionamento pode ser um motor elétrico e uma redução mecânica, ou então um solenóide recebendo um sinal de controle do tipo PWM. Diferente das válvulas descritas no parágrafo anterior este solenóide opera de forma proporcional, pois o sinal PWM aqui fornecido possui intervalo de tempo muito pequeno fazendo com que a válvula flutue na abertura desejada.

Na área de fertilizantes fluídos já existem diversos sistemas comerciais que operam tanto com acionamento por meio de motor e redutor como gerando um sinal de controle do tipo PWM. Alguns exemplos são: o controlador SCS 440, produzido pela Raven Industries; o controlador Land Manager, produzido pela Dickey John; o controlador ZYNX X15, produzido pela KEE Technologies; e o controlador Legacy, produzido pela MidTech.

Nos sistemas dotados de bombas peristálticas ou de pistão, não são empregadas válvulas para regular a vazão do líquido. Nestes sistemas a atuação se dá através do controle da rotação no eixo das bombas. Como não existe excedente de vazão de líquido retornando ao reservatório, há a necessidade da implementação de um sistema de agitação independente.

Após a passagem do líquido pela bomba, e eventualmente pelas válvulas de controle de vazão, este é depositado no solo.

2.4.4. Controle

O controle das válvulas que regulam a dosagem dos fertilizantes geralmente é feito por um dispositivo específico, um controlador eletrônico. Este aparelho nada mais é do que um microcomputador, projetado especialmente para esta aplicação, dotado de um conjunto de interfaces. As interfaces têm a função de conectar o microcomputador ao mundo externo, ou seja, aos sensores, atuadores e sinais de dados. Elas recebem as informações dos sensores, e qualquer outro dispositivo de entrada, e as transformam em dados que possam ser entendidos pelo microcomputador. Da mesma forma, as interfaces operam enviando instruções e informações do microcomputador para os atuadores e qualquer outro dispositivo de saída. A conexão da interface com o sensor ou atuador é denominada de porta de entrada ou de saída.

Os sensores podem ser qualquer tipo de transdutor que efetue a leitura de alguma grandeza física e a transforme em um sinal elétrico, tais como sensores de temperatura, pressão, força, deslocamento, velocidade, etc. Os atuadores, por sua vez, são dispositivos capazes de transformar o sinal enviado pelo controlador em uma ação física, podendo-se

exemplificar os motores, bobinas solenóides, resistências, etc. Quanto aos demais dispositivos de entrada e saída de dados, estes geralmente são circuitos eletrônicos dedicados a efetuar algum tipo de leitura ou atuação, ou então um outro controlador ou microcomputador externo.

Os controladores eletrônicos apresentam um grande leque de aplicações. Podem ser empregados na operação de máquinas industriais, aparelhos residenciais, aparelhos automotivos, dentre outros. Eles podem ser de uso geral ou dedicado. Os controladores de uso geral são dotados de um conjunto predefinido de portas, permitindo a sua ligação com um certo número de sensores e atuadores. Nem sempre o número e o tipo das portas (interfaces) é o mais adequado para a aplicação, isto é, podem sobrar portas que não serão utilizadas. Os controladores dedicados são desenvolvidos para uma aplicação específica, como é o caso dos controladores utilizados na aplicação de fertilizantes líquidos. Diferente dos controladores de uso geral, onde tem que se programar e especificar quais tipos e quantas interfaces se desejar, os específicos para fertilizantes líquidos já vem com a sua programação interna pronta, e com a quantidade e tipo exato de interfaces para efetuar a operação de aplicação. Geralmente vêm incorporados com funções adicionais, como uma IHM (Interface Homem Máquina), que além de monitorar e controlar os parâmetros de operação do controlador, também efetuam algumas funções de cálculos, as quais são úteis ao operador. Descreve-se a seguir alguns modelos de controladores para a aplicação de fertilizantes líquidos existentes no mercado.

- DICKY-john, Land Manager I e II:

- Controlador para a aplicação de defensivos e fertilizantes sólidos ou líquidos. Inicialmente este controlador foi desenvolvido para operar sozinho, efetuando aplicação a taxa constante. A versão I controla um atuador, em malha fechada, que pode ser uma válvula de pulverização, uma válvula óleo-hidráulica, motores elétricos, dentre outros. A versão II apresenta todas as características da I e também controla dois atuadores. O fechamento da malha pode ser feito por diferentes tipos de sensores, medindo o fluxo na linha, a rotação de um eixo, dentre outras opções. Além disso, esses sistemas possuem uma conexão de porta serial que possibilita a sua operação a taxas variáveis, recebendo os dados de aplicação de um computador externo;



Figura 24 - Central de controle para aplicação de fertilizantes líquidos a taxa fixa. Também aplica a taxas variáveis recebendo as informações através de um computador externo (DICKEY JOHN, 2003)

- Midwest Technology, TASC 6000 series:
 - o Aparelho capaz de controlar um conjunto de bombas dosadoras, operando um circuito onde os nutrientes são diluídos em uma linha com água. Opera aplicação a taxas variáveis recebendo as informações da taxa de aplicação de um computador externo, através de uma interface externa fornecida pelo mesmo fabricante.



Figura 25 - Central de controle para a aplicação de fertilizantes líquidos a taxa fixa, também variando a formulação através de nutrientes diluídos em água. Também aplica a taxas variáveis recebendo as informações através de um computador externo (MIDWEST TECHNOLOGY, 2003)

- Midwest Technology, Sistema Legacy 6000
 - o Microcomputador dedicado específico para agricultura de precisão sendo capaz de processar várias operações simultaneamente. Neste sistema, o processamento é feito de forma modular, o Legacy 6000 funciona como um console capaz de efetuar a comunicação com diferentes tipos de equipamentos, controladores externos e receptores de GPS da TRIMBLE, através de duas interfaces seriais RS232 e uma USB, e com todos os seus

módulos através de um barramento serial CAN. Os módulos também possuem processamento, ou seja, são inteligentes e apenas comunicam-se com o console. Um exemplo disto está na função de piloto automático, todo o processamento desta função é feito através de um módulo controlador de navegação que comunica-se diretamente com um receptor de GPS, efetua a leituras dos sensores de inclinação e da direção e controla o atuador que dirige as rodas. O console principal apenas recebe os parâmetros que devem ser informados para o usuário através da sua tela. Desta forma, o console principal precisa de menos processamento para executar várias funções. Neste conceito, o sistema Legacy é capaz de operar como piloto automático, sistema de navegação com barra de luzes, sistema de geração de mapas em tempo real, controlador de aplicação a taxas variáveis, e gerador de relatórios impressos das operações que realizou no campo. O console também possui um módulo capaz de desligar automaticamente as seções de um pulverizador na medida em que este sai da área definida para aplicação. O módulo de aplicação a taxas variáveis é capaz de operar até três atuadores em malha fechada. Este módulo opera com diferentes tipos de sensores e atuadores podendo controlar qualquer tipo de equipamento de aplicação, com até três insumos diferentes.



Figura 26 - Console do sistema Legacy 6000, da Midwest Technology, efetua diversas funções simultaneamente, aplicação a taxas variáveis, piloto automático, controle de navegação e mapeamento em tempo real (Spraying Systems, 2004)

- Raven Industries, SCS series:
 - Controlador capaz de operar a sua aplicação controlando uma válvula proporcional por linha, em malha fechada. A maior parte dos controladores opera com taxa de aplicação constante. O modelo SCS 700 aceita aplicação a taxas variáveis, através de conexão com um computador, assim como o Land Manager e o TASC 6000.



Figura 27 - Central de controle SCS 760, para a aplicação de fertilizantes líquidos a taxa fixa, também variando a formulação através de nutrientes diluídos em água. Aplica a taxas variáveis recebendo as informações através de um computador externo (RAVEN INDUSTRIES, 2003)

- KEE TECHNOLOGIES, Eagle E15:
 - Controlador capaz de operar a aplicação de até quatro produtos diferentes, através do controle de quatro atuadores, em malha fechada, que podem ser válvulas hidráulicas ou óleo-hidráulicas, motores elétricos, dentre outros. Este modelo também opera com aplicação a taxas variáveis através da conexão com um outro controlador do mesmo fabricante, o ZYNX.



Figura 28 - Console de controle EAGLE E15, para a aplicação de até quatro insumos diferentes a taxas fixas. Também aplica a taxas variáveis recebendo as informações de um controlador externo do mesmo fabricante (KEE TECHNOLOGIES, 2005)

- KEE TECHNOLOGIES, ZYNX X15:
 - o Microcomputador dedicado específico para uso em agricultura de precisão, sendo capaz de processar diferentes tipos de operação simultaneamente. Possui a função de um controlador capaz de operar a aplicação de até quatro produtos diferentes, através do controle de quatro atuadores, em malha fechada, que podem ser válvulas hidráulicas ou óleo-hidráulicas, motores elétricos, dentre outros. Este modelo também opera controlando até 256 atuadores, de diferentes tipos, em malha aberta. Possui diferentes tipos de telas para a aplicação de fertilizantes líquidos, sólidos, a lanço ou em pulverização. Também possui a função de aplicação a taxas variáveis, dispensando o uso de um computador externo, conecta-se diretamente com sistemas de GPS ou DGPS, armazena diferentes formatos de mapas de aplicação em sua memória podendo inclusive criar mapas de aplicação em tempo real. Também é capaz de se comunicar e controlar outros equipamentos da linha, como o EAGLE E15. Esse controlador também possui a função de monitor de adubo e sementes, bem como a de guia ou de piloto automático, controlando a direção hidráulica e o acelerador do trator ou de um impelente autopropelido, incluindo opcional para levantar uma plantadeira automaticamente ao final da linha ou desligar uma bomba de pulverização. Neste sistema, o console efetua todo processamento, sendo o acionamento dos atuadores e a leitura dos sensores feitos por intermédio de interfaces conectadas ao console por meio de cabos de comunicação serial (RS 232). Essas interfaces podem ser instaladas tanto no trator como no próprio implemento. O controlador pode memorizar diferentes tipos de aplicações, podendo o mesmo aparelho ser intercambiado entre diferentes tipos de implementos, desde plantadeiras até distribuidores de calcário ou pulverizadores, bastando para isso trocar a interface conectada.

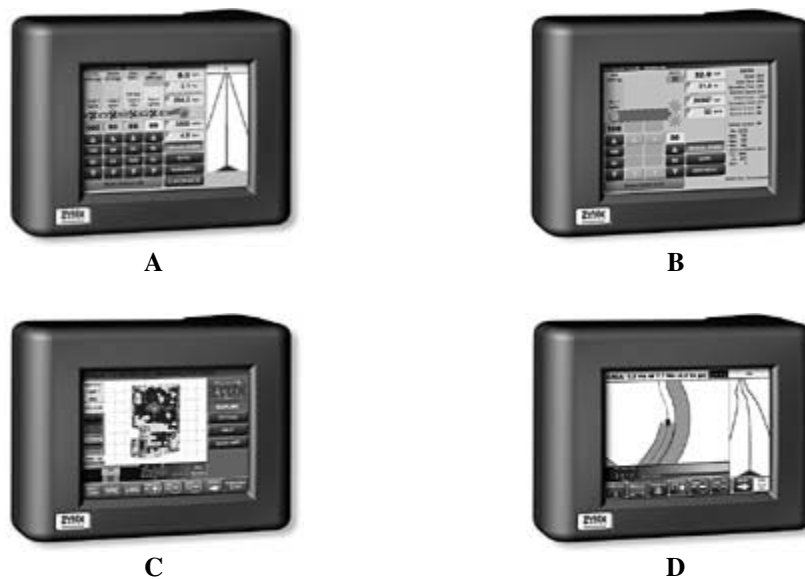


Figura 29 - Console de controle ZYNX X15, para a aplicação de até quatro insumos diferentes a taxas variáveis, em sistemas de malha fechada, podendo chegar a 256 insumos em malha aberta. Também efetua outras funções, como monitor de sementes e piloto automático. As quatro figuras representam respectivamente as telas para: A) aplicação de fertilizantes sólidos ou líquidos; B) aplicação de fertilizantes a lanço; C) aplicação a taxas variáveis através de um mapa de aplicação; D) controle do trator por piloto automático (KEE TECHNOLOGIES, 2005)

2.4.5. Sistemas de aplicação de fertilizantes líquidos comerciais

Os sistemas de aplicação de fertilizantes líquidos apresentam-se em diferentes configurações, podendo ser tracionados ou autopropelidos.

Os sistemas tracionados geralmente apresentam-se na forma de implementos de arrasto, mesmo nas menores versões. Diferente do que ocorre com o fertilizante sólido, o fertilizante líquido apresenta uma grande flexibilidade em relação à localização dos reservatórios, o que permite que este seja colocado nas posições que forem julgadas mais convenientes. Em função disto, dependendo do fabricante, a localização do reservatório pode mudar, ficando antes ou depois do ponto de aplicação, ou mesmo no próprio trator. Existe uma boa quantidade de fabricantes destes aparelhos em todo o mundo. Para efeito de exemplificação, serão citados:

- Adams Fertilizer Equipment, que possui o modelo Adams 12-Row Hydraulic Double Fold Applicator, com capacidade para até 3,8m³ de fertilizante. Não possui opcional para aplicação a taxas variáveis;



Figura 30 - Sistema de aplicação de fertilizantes líquidos, 12-Row Hydraulic Double Fold Applicator, fabricado pela Adams Fertilizer (DEALER AND APPLICATOR, 2003)

- The KBH Corp., que possui os modelos Coulter Knife Injection Applicator e Front-Mount Toolbar Applicator. Ambos possuem capacidade para até 3,88m³, e não possuem opcional para aplicação a taxas variáveis;



A



B

Figura 31 - A) Sistema de aplicação de fertilizantes líquidos, Coulter Knife Injection Applicator, da KBH Corp, com os aplicadores instalados na traseira do implemento. B) Outro implemento, o Front-Mount Toolbar Applicator, do mesmo fabricante, com os aplicadores instalados a frente do reservatório de fertilizante (DEALER AND APPLICATOR, 2003)

- Progressie Farm Products Inc., que possui o modelo: 2450 Dual Placement Applicator. Com capacidade para até 6m³ de fertilizante, esse sistema possui opcional para aplicação a taxas variáveis;

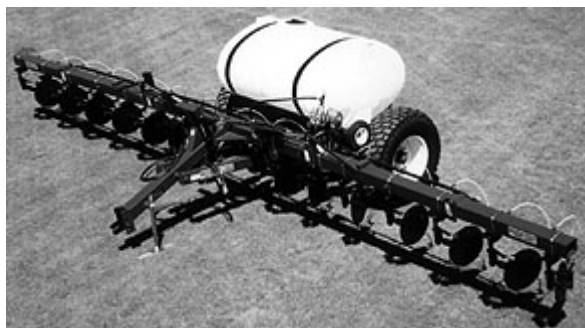


Figura 32 - Foto do 2450 Dual Placement Applicator, sistema de aplicação de fertilizantes líquidos (PROGRESSIVE FARM PRODUCTS INC., 2003)

Apesar de nem todos os sistemas de aplicação de fertilizantes líquidos possuírem opcional de fábrica para a aplicação a taxas variáveis, boa parte dos controladores, sensores e válvulas fabricados para este fim, como os sistemas da LH Agro, Dickey John, KEE Technologies, podem ser instalados em praticamente qualquer aparelho.

Os sistemas autopropelidos podem se apresentar como aparelhos específicos para a função ou como caminhões adaptados, podendo ser exemplificados os fabricantes:

- Ag-Chem, com os modelos da série TerraGator. Tanques para até 19m³, motores entre 224 e 350kW e opção de aplicação a taxas variáveis com atuadores para altas vazões;
- Case IH Application Equipment, com o modelo FLX 3300 Titan. Motor de 224kW, não possuindo opcional para a aplicação a taxas variáveis.

Nestes equipamentos também existe a possibilidade de se instalar um sistema de aplicação a taxas variáveis. A Figura 33 ilustra um dos sistemas de aplicação da Ag-Chem.



A



B

Figura 33 - A) Sistema para aplicação de fertilizantes líquidos operando com subsolador. B) Mesmo sistema operando com aplicação sobre o sulco (AGCHEM EUROPE B.V., 2003)

Pode-se observar que tanto em relação aos sistemas de aplicação a taxas variáveis, quanto às próprias máquinas e implementos, muito do que é fabricado hoje para a aplicação de fertilizantes líquidos opera com o uso de pulverização, pois se destina a adubação foliar. Outra grande gama de aparelhos dedica-se a aplicação da amônia anidra, amplamente empregada nos Estados Unidos, mas que apresenta sérios riscos ao operador caso este não esteja devidamente treinado e aparelhado.

No entanto, as opções para a aplicação de fertilizantes líquidos diretamente no solo podem ser instaladas diretamente em implementos tradicionais, não necessitando de sistemas específicos. Um exemplo disto é o dispositivo para a aplicação de fertilizantes líquidos em máquinas de plantio direto, modelo Maverik, fabricado pela Yetter Farm Products, ilustrado na Figura 9.

Percebe-se então, que não existem equipamentos específicos para a aplicação de fertilizantes líquidos diretamente no solo, a taxas e formulações variáveis. No entanto, existe a possibilidade de desenvolvimento de dispositivos capazes de aproveitar os implementos tradicionais já existentes no campo. Tal afirmação baseia-se no fato de que a adaptação de um sistema de distribuição de fertilizantes líquidos requer os mesmos tipos de componentes de um sistema de fertilizantes sólidos, ou seja, um reservatório, um dosador (no caso dos líquidos uma bomba dosadora) e uma tubulação que conduza o fertilizante até o ponto desejado no solo, com a vantagem de que os sistemas desenvolvidos para fertilizantes líquidos apresentam uma maior flexibilidade na hora de posicionar estes componentes. O sistema de aplicação a taxas variáveis será o mesmo independente do tipo de fertilizante.

Deste modo, qualquer implemento que opere com a distribuição de fertilizantes sólidos pode ser adaptado para fertilizantes líquidos, o que irá diferir poderá ser a concentração dos fertilizantes, isto poderá alterar a autonomia do implemento ou a capacidade de seu depósito, e conseqüentemente o peso dos novos reservatórios utilizados. A alteração na autonomia, caso mantenha-se a mesma capacidade de peso do implemento, ou eventual mudança no projeto estrutural do chassi, caso deseje-se manter a autonomia obtida com o fertilizante sólido, pode ser uma vantagem ou uma dificuldade dependendo das características dos fertilizantes empregados em cada situação. Ocorrerão casos onde a concentração do nutriente por massa de concentrado do fertilizante será maior nos líquidos em relação aos sólidos, da mesma forma que haverá casos onde ocorrerá o contrário. Quanto maior a

concentração obtida, menor será a massa de fertilizante a ser transportada para atender a uma mesma aplicação.

No entanto, os sistemas empregando fertilizantes líquidos não ficam presos às posições tradicionais de instalação de seus reservatórios. Existe a possibilidade de se operar com um grande reservatório instalado em uma carreta auxiliar tracionando, ou tracionada pelo implemento. O emprego dessa alternativa transfere todo o peso de fertilizante a ser aplicado sobre a estrutura do implemento para a carreta auxiliar, permitindo inclusive uma redução na estrutura do implemento, se isso for considerado conveniente.

A colocação dos reservatórios em locais alternativos, como uma carreta auxiliar, ou no próprio trator, possibilitam a adaptação de implementos que originalmente não efetuam a aplicação de fertilizantes, como, por exemplo, grades, arados e subsoladores.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Como o objetivo deste trabalho de pesquisa abrange idealizar, desenvolver e avaliar um dispositivo, ele foi composto de uma etapa de concepção, uma de projeto e uma de avaliação. Para cada uma destas etapas corresponde uma metodologia a ser empregada.

3.1. Sistema de aplicação de fertilizantes líquidos

Para elaboração da concepção do sistema de aplicação de fertilizantes líquidos, desenvolvido neste trabalho, foi realizada uma consulta à literatura com o objetivo de se obter uma configuração básica do equipamento.

Objetivou-se conceber um sistema de aplicação de fertilizantes líquidos com a capacidade de operar a aplicação de três soluções distintas simultaneamente, a taxas variáveis. Deste modo, tornando-se capaz também de variar a formulação aplicada variando a proporção entre os três produtos.

A fim de se tornar o sistema mais acessível, buscou-se utilizar fontes de transmissão de potência do motor, já disponíveis em um trator comercial, ou seja, a potência mecânica transmitida pela TDP, a potência hidráulica transmitida pela bomba hidráulica, ou então a potência elétrica transmitida pelo alternador.

Outra característica buscada no equipamento foi torná-lo simples, podendo ser facilmente instalado em diferentes tipos de implementos, bem como permitir uma manutenção menos freqüente, ou mais fácil de ser efetuada.

3.2. Desenvolvimento da bancada de testes

Definido o conceito do sistema, partiu-se para a obtenção de uma versão do sistema passível de ser construída, estudada e avaliada. Para tanto foi desenvolvida uma bancada de testes capaz de simular, de forma similar a uma situação real, o comportamento das válvulas dosadoras.

Durante o seu dimensionamento procurou-se desenvolver e estabelecer parâmetros operacionais representativos de um sistema real, o que compreende a capacidade do sistema operar de forma automatizada, processando a dosagem de três concentrados distintos.

3.3. Seleção da válvula dosadora

Pretendeu-se utilizar uma válvula dosadora de custo reduzido para controle da vazão do fertilizante líquido. Para tanto, iniciou-se utilizando uma válvula do tipo aberta/fechada acionada por meio de solenóide e controlada por um amplificador PWM.

3.3.1. Identificação das válvulas comerciais

Foram realizadas consultas aos fabricantes de válvulas solenóides do mercado nacional visando identificar os modelos disponíveis que atendessem aos parâmetros do projeto.

As características das válvulas consideradas foram relacionadas à resistência mecânica, especialmente à abrasão, e à resistência química aos componentes dos concentrados utilizados como fertilizantes líquidos. O tipo de controle de fluxo da válvula (diafragma, obturador plano ou cônico e outros) e seu custo também foram considerados nesta consulta.

3.3.2. Avaliação das válvulas comerciais

As válvulas obtidas foram submetidas a um processo de avaliação experimental visando obter seu desempenho, principalmente no que diz respeito às características de repetitividade, histerese e linearidade.

Os ensaios para a obtenção destas características foram realizados na bancada de testes desenvolvida neste trabalho.

O procedimento adotado consistiu em se colocar a válvula em operação e registrar sua vazão volumétrica de saída em alguns percentuais de abertura.

Seria selecionada a válvula que apresentasse o melhor desempenho em relação a repetitividade e histerese, e por último seria avaliada a não-linearidade.

Caso não fosse encontrada nenhuma válvula que atendesse aos requisitos, partir-se-ia então para o desenvolvimento de uma válvula capaz de atender a esse fim.

3.4. Desenvolvimento da válvula dosadora

3.4.1. Projeto e construção

Nesta fase buscou-se preservar a proposta de baixo custo estabelecida durante a fase de concepção do sistema. Portanto, alternativas como aproveitar componentes de fácil aquisição, já existentes no mercado, foram valorizadas.

Tendo-se em vista o objetivo de buscar um acionamento da válvula mais adequado ao projeto do que o feito por solenóide, proposto anteriormente, novas opções foram estudadas.

Definido o tipo de válvula a ser utilizado e o seu acionamento, esta foi então projetada e construída.

O projeto do sistema mecânico de acoplamento da válvula ao servo-motor foi feito através de um modelamento em realidade virtual, utilizando-se o *software Dassault SolidWorks* versão 2003, o qual rodou em um microcomputador padrão IBM-PC modelo *Pentium 4*, com 2,4GHz de velocidade, 1GByte de memória RAM, disco rígido 40GBytes, placa de vídeo NVidia GForce MX/MX 400 com 64MBytes de memória, executando o sistema operacional Windows XP Professional - SP1.

Elaborado o projeto, foi então providenciada a construção das partes desta junto a uma empresa de tornearia e usinagem na região de Ribeiro Preto, estado de São Paulo.

Devido à simplicidade dos componentes da válvula não houve a necessidade de se elaborar um procedimento de montagem para esta.

3.4.2. Planejamento experimental

Para averiguar a validade do projeto da servo-válvula desenvolvida, o primeiro protótipo desta foi submetido a um ensaio preliminar. Neste, a servo-válvula desenvolvida foi avaliada, sendo submetida a dez níveis, igualmente espaçados, de abertura e de fechamento, excursionando de totalmente fechada a totalmente aberta. Este procedimento foi repetido três vezes.

Em função dos dados obtidos, buscou-se melhorá-los elevando-se o número de níveis para quatorze. Esse procedimento foi utilizado no ensaio com o primeiro protótipo da servo-válvula.

Os níveis de abertura e fechamento foram obtidos por meio do percentual de ciclo ativo do sinal cíclico fornecido pelo amplificador PWM ao servo-motor da servo-válvula.

O líquido utilizado nestes experimentos foi a água a temperatura ambiente controlada.

A pressão na linha à montante da servo-válvula foi mantida em um valor fixo, em torno de 100kPa, sendo descarregada à pressão atmosférica local. Com os resultados deste ensaio foi possível verificar a necessidade ou não de se efetuar correções no projeto da mesma.

Verificada necessidade de se efetuar correções no projeto foi então formulada uma hipótese que pudesse explicar o comportamento não desejado. O ensaio realizado para verificar esta hipótese mediu o deslocamento do obturador cônico na operação de abertura e de fechamento. Isto foi feito submetendo-se a servo-válvula a 21 níveis de abertura e 21 níveis de fechamento igualmente espaçados, excursionando-a de totalmente aberta a totalmente fechada, e de totalmente fechada a totalmente aberta.

As correções no projeto buscaram eliminar o efeito formulado pela hipótese. Conforme também será visto nos resultados, estas consistiram em incluir uma mola pressionando a rosca do fuso.

Implementadas as alterações propostas no primeiro protótipo, obteve-se o protótipo final da servo-válvula desenvolvida. Este foi submetido a um novo ensaio, que ocorreu da mesma forma que o ensaio com o primeiro protótipo. Uma vez que o ensaio com o primeiro protótipo já mostrou a forma típica em que se apresentam as curvas obtidas para a servo-válvula, reduziram-se o número de níveis de abertura ensaiados para onze, concentrando-se mais pontos no trecho de maior variação na taxa de crescimento da curva.

Para verificar se o protótipo final não se comportaria de forma diferente quando submetido a uma pressão inferior a nominal, ou seja, 100kPa, foi realizado um outro ensaio, submetendo este a uma pressão em torno de 50kPa.

Após a análise dos resultados obtidos nos ensaios realizados com o protótipo final da servo-válvula, decidiu-se estabelecer como limite mínimo de utilização desta aberturas a partir de 25%. A justificativa desta decisão encontra-se descrita nos resultados.

Após definido o limite mínimo de utilização, foram realizados os ensaios finais para avaliar o protótipo final da servo-válvula. Estes ensaios finais ocorreram da mesma forma que os dois ensaios anteriores, também às pressões de 100kPa e 50kPa.

Em todos os ensaios, e em cada um dos níveis de abertura e fechamento, foi medida a vazão volumétrica média depois de alcançado o regime de funcionamento.

A vazão volumétrica média foi obtida indiretamente coletando-se, em um recipiente de volume conhecido, o fluxo de água liberado pela servo-válvula e medindo-se o tempo necessário para encher este volume.

Com esse procedimento foi possível calcular a repetitividade, histerese e não-linearidade dos protótipos.

3.4.3. Critério de avaliação

A validação da servo-válvula desenvolvida foi realizada por meio de um teste de avaliação final, onde se observou o seu comportamento.

Os seguintes critérios foram estabelecidos para a validação:

- repetitividade;
- histerese;
- não linearidade.

Estes parâmetros foram estabelecidos e determinados quantitativamente conforme norma NBR10584 (1989), onde:

- REPETITIVIDADE = a diferença máxima entre sinais de saída, para aplicação da mesma condição de abertura, condições de ambiente e de solicitação, expressa em porcentagem do sinal de saída nominal;
- HISTERESE = a diferença máxima entre leituras do sinal de saída, obtida a partir da curva de calibração, para aberturas crescentes e decrescentes até a capacidade nominal, expressa em porcentagem do sinal de saída nominal;
- NÃO LINEARIDADE = ao desvio máximo entre a curva de calibração com aberturas crescentes e a reta de referência, expressa em porcentagem do sinal de saída nominal. No caso deste trabalho, a reta de referência é a reta ajustada aos pontos obtidos pelo ensaio, através do método dos mínimos quadráticos.

A determinação destes parâmetros obedeceu às equações:

$$R_i = \left| \max \left(\begin{array}{l} \left(\max(A_{i,1}, A_{i,2}, A_{i,3}) - \min(A_{i,1}, A_{i,2}, A_{i,3}) \right) \cdot \frac{100}{\bar{V}_{m\acute{a}x}}, \\ \left(\max(D_{i,1}, D_{i,2}, D_{i,3}) - \min(D_{i,1}, D_{i,2}, D_{i,3}) \right) \cdot \frac{100}{\bar{V}_{m\acute{a}x}} \end{array} \right) \right|; \quad (2)$$

$$H_i = \left| \left(\frac{\sum_{j=1}^3 A_{i,j}}{3} - \frac{\sum_{j=1}^3 D_{i,j}}{3} \right) \cdot \frac{100}{\bar{V}_{m\acute{a}x}} \right|; \quad (3)$$

$$NL_i = \left| \left(\frac{\sum_{j=1}^3 A_{i,j}}{3} - (a \cdot x_i + b) \right) \cdot \frac{100}{\bar{V}_{m\acute{a}x}} \right|; \quad (4)$$

onde:

- R_i é a repetitividade, em porcentagem do sinal de saída nominal;
- H_i é a histerese, em porcentagem do sinal de saída nominal;
- NL_i é a não-linearidade, em porcentagem do sinal de saída nominal;
- $A_{i,j}$ corresponde aos valores de vazão nos ensaios ascendentes, ou de abertura, em mL.s⁻¹;
- $D_{i,j}$ corresponde aos valores de vazão nos ensaios descendentes, ou de fechamento, em mL.s⁻¹;
- i é a linha correspondente a cada percentual de abertura da válvula;
- j é a coluna correspondente a cada repetição do ensaio;
- $\bar{V}_{m\acute{a}x}$ corresponde a vazão média de todos os ensaios, observada na abertura nominal da válvula, ou seja, a 100%.
- a corresponde ao coeficiente angular da reta de referência;
- b corresponde ao coeficiente linear de reta de referência;
- x_i corresponde ao percentual de abertura da servo-válvula, em cada linha i .

Foi avaliado em primeiro lugar se a servo-válvula apresentou uma boa repetitividade. Em segundo, se ela apresentou uma boa histerese. Isso foi feito considerando-se que o sistema deve operar em malha aberta.

A não-linearidade foi a última característica considerada como um critério de avaliação, já que sempre poderá ser corrigida por meio de *software*.

Aprovada, a servo-válvula foi instalada na bancada de testes para obtenção do modelo matemático experimental de seu desempenho em funcionamento real.

3.5. Modelo matemático do sistema

Considerando-se que a medição da vazão exige sensores sensíveis e de custo elevado, optou-se em implementar um sistema para controle da vazão do tipo malha aberta. Para tanto, é necessário o conhecimento do desempenho da servo-válvula no que diz respeito à sua vazão em função do seu percentual de abertura e pressão de trabalho, fatores que acredita-se serem os que mais influenciam na vazão obtida.

O desenvolvimento de uma modelagem analítica, embora até certo ponto possível, fica dificultado devido ao desconhecimento dos diversos fatores que influenciam no desempenho da servo-válvula. Optou-se, então, pela obtenção de uma modelagem matemática baseada em procedimentos experimentais.

3.5.1. Planejamento experimental do modelo linear

Considerando-se que diversos fatores influenciam no comportamento da válvula, um planejamento fatorial multivariado completo foi necessário. O planejamento fatorial 2^k a ser utilizado foi o apresentado por NETO et al. (2001).

Este procedimento experimental permite o estudo de efeitos e interações das variáveis controladas (fatores) a partir de ensaios com valores previamente definidos (níveis), possibilitando um estudo do comportamento da variável dependente (resposta).

O planejamento fatorial inicialmente proposto foi o de dois níveis, sendo os fatores fixados em um valor máximo (+1) e um valor mínimo (-1) - níveis máximo e mínimo, respectivamente. Os níveis são correlacionados com um nível central de referência (nível 0).

O número de ensaios do planejamento para o modelo linear foi definido como sendo 2^k , onde o valor k representa a quantidade de variáveis (fatores) estudados.

O experimento foi repetido três vezes em igualdade de condições no nível central de cada fator, com o intuito de se determinar os erros experimentais.

A significância estatística dos fatores estudados foi avaliada por meio do teste “F” e sua comparação com o valor tabelado para o nível de significância adotado.

3.5.1.1. Variável resposta

A variável de resposta foi a vazão volumétrica média obtida nos experimentos.

$$y = \text{vazão volumétrica média (mL.s}^{-1}\text{)}$$

3.5.1.2. Fatores

Os fatores manipulados foram; o percentual de abertura da válvula e a pressão na linha, portanto $k = 2$.

$$X_1 = \text{abertura da válvula (\%)}$$

$$X_2 = \text{pressão na linha (kPa)}$$

3.5.1.3. Níveis dos fatores

Os níveis dos fatores estudados estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Níveis e valores absolutos dos fatores

	X₁ (%)			X₂ (kPa)		
Valores dos níveis	-1	0	+1	-1	0	+1
Valores absolutos	41,3	62,5	83,7	50	75	100

3.5.1.4. Planejamento fatorial

Os ensaios foram conduzidos de acordo com as combinações da Tabela 4. Para garantir que os resultados fossem independentes, a sequência dos ensaios foi definida de forma totalmente aleatória. Logo, não obedeceu à sequência descrita na respectiva tabela. Para garantir a total aleatoriedade dos ensaios, a cada ponto levantado, e em cada uma das repetições do ensaio, todo o procedimento foi repetido, desde o acionamento e regulação da bancada e do protótipo até a obtenção dos dados.

Tabela 4 - Resultado do planejamento fatorial 2^2 com repetições no nível central

Ensaio	X_1	X_2	y
1	-1	-1	y_1
2	+1	-1	y_2
3	-1	+1	y_3
4	+1	+1	y_4
5	0	0	y_5
6	0	0	y_6
7	0	0	y_7

OBS: Nesta tabela, os valores y_n correspondem aos resultados que foram obtidos experimentalmente para a variável dependente (resposta).

3.5.1.5. Matriz dos coeficientes de contraste

A média, efeitos principais e interações foram determinados através de algoritmos matriciais. Para tanto, a matriz dos coeficientes de contraste, necessária aos cálculos, obedeceu às combinações da Tabela 5.

Tabela 5 - Coeficientes de contraste para um fatorial 2^2 com repetições no nível central

Ensaio	Média	X_1	X_2	X_1X_2
1	+1	-1	-1	+1
2	+1	+1	-1	-1
3	+1	-1	+1	-1
4	+1	+1	+1	+1
5	+1	0	0	0
6	+1	0	0	0
7	+1	0	0	0

Com esta tabela, obtém-se a matriz dos coeficientes de contraste X , que foi:

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

3.5.1.6. Estimativa do erro experimental

O erro experimental foi obtido através do cálculo da variância e do desvio padrão dos valores obtidos no ensaio com o três fatores em nível “0”, correspondente aos ensaios 5, 6 e 7 da Tabela 4, acrescidos das variâncias de todos os demais valores, sendo que todas as combinações de níveis, descritas na mesma tabela, foram levantadas com cinco repetições.

3.5.1.7. Modelo estatístico

O modelo matemático empírico inicialmente é dado por:

$$y(x_1, x_2) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \beta_{12} X_1 X_2 + \varepsilon(x_1, x_2)$$

No entanto, para determinar os valores exatos de β_n , seriam necessários infinitos experimentos, já que são valores populacionais. Portanto, foram calculados os coeficientes b_0, b_1, b_2 e b_{12} , chamados de estimadores dos parâmetros populacionais $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ e β_{12} .

Deste modo o modelo matemático empírico foi dado por:

$$\hat{y}(x_1, x_2) = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (5)$$

3.5.1.8. Cálculo dos coeficientes b_n

O cálculo dos coeficientes do modelo matemático empírico pode ser determinado através da equação:

$$\mathbf{b} = (\mathbf{X}' \mathbf{X})^{-1} \mathbf{X}' \mathbf{y} \quad (6)$$

onde:

- $\mathbf{b}$ corresponde aos coeficientes do modelo matemático empírico;
- $\mathbf{X}$ corresponde a matriz dos coeficientes de contraste;
- $\mathbf{y}$ corresponde ao vetor coluna com os resultados dos experimentos.

3.5.2. Planejamento experimental do modelo quadrático

O planejamento de dois níveis, descrito no item 3.5.1 possibilita a obtenção de um modelo linear. Em situações onde o modelo linear não descreve mais adequadamente o objeto em estudo, torna-se necessário elevar a ordem deste, partindo-se para um modelo quadrático, e para tanto, é preciso ampliar o ensaio. A forma mais comum de se fazer isto é através do planejamento central composto rotacionado, também denominado de planejamento em estrela, onde um novo jogo de níveis, rotacionados em 45° , é acrescentado. Isto resulta na inclusão dos níveis $(+\sqrt{2})$ e $(-\sqrt{2})$ ao planejamento anterior.

O número de ensaios do planejamento para o modelo quadrático passa a ser definido como sendo o dobro de 2^k , onde o valor k representa a quantidade de variáveis (fatores) estudados.

Neste planejamento podem ser aproveitados todos os ensaios realizados no experimento anterior, apenas acrescentando-se os novos ensaios rotacionados.

3.5.2.1. Níveis dos fatores

Os níveis dos fatores estudados neste planejamento estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 6 - Níveis e valores absolutos dos fatores para o planejamento em estrela

	X₁ (%)					X₂ (kPa)				
Valores dos níveis	$-\sqrt{2}$	-1	0	+1	$+\sqrt{2}$	$-\sqrt{2}$	-1	0	+1	$+\sqrt{2}$
Valores absolutos	32,5	41,3	62,5	83,7	92,5	39,75	50	75	100	110,25

3.5.2.2. Planejamento fatorial

Os ensaios para o modelo quadrático foram conduzidos de acordo com as combinações da Tabela 7. Da mesma forma, para garantir que os resultados sejam independentes, a sequência dos novos ensaios foi definida de forma totalmente aleatória. Logo, não obedeceu à sequência descrita na respectiva tabela. Assim como, para garantir a total aleatoriedade dos ensaios, a cada ponto levantado, e em cada uma das repetições do ensaio, todo o procedimento foi repetido, desde o acionamento e regulagem da bancada e do protótipo até a obtenção dos dados.

Tabela 7 - Resultado do planejamento fatorial 2² em estrela com repetições no nível central

Ensaio	X₁	X₂	y
<i>1</i>	-1	-1	y ₁
<i>2</i>	+1	-1	y ₂
<i>3</i>	-1	+1	y ₃
<i>4</i>	+1	+1	y ₄
<i>5</i>	0	0	y ₅
<i>6</i>	0	0	y ₆
<i>7</i>	0	0	y ₇
<i>8</i>	$-\sqrt{2}$	0	y ₈
<i>9</i>	0	$+\sqrt{2}$	y ₉
<i>10</i>	$+\sqrt{2}$	0	y ₁₀
<i>11</i>	0	$-\sqrt{2}$	y ₁₁

OBS: Nesta tabela, os valores y_n correspondem aos resultados que serão obtidos experimentalmente para a variável dependente (resposta).

3.5.2.3. Cálculo da Matriz dos Coeficientes de Contraste

A média, efeitos principais e interações também foram determinados através de algoritmos matriciais. Para tanto, a matriz dos coeficientes de contraste, necessária aos cálculos, obedeceu às combinações da Tabela 8.

Tabela 8 - Coeficientes de contraste para um planejamento fatorial 2^2 em estrela com repetições no nível central

Ensaio	Média	X_1	X_2	X_1^2	X_2^2	X_1X_2
1	+1	-1	-1	+1	+1	+1
2	+1	+1	-1	+1	+1	-1
3	+1	-1	+1	+1	+1	-1
4	+1	+1	+1	+1	+1	+1
5	+1	0	0	0	0	0
6	+1	0	0	0	0	0
7	+1	0	0	0	0	0
8	+1	$-\sqrt{2}$	0	+2	0	0
9	+1	0	$+\sqrt{2}$	0	+2	0
10	+1	$+\sqrt{2}$	0	+2	0	0
11	+1	0	$-\sqrt{2}$	0	+2	0

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

$$X = \begin{bmatrix} +1 & -1 & -1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & +1 & +1 & -1 \\ +1 & -1 & +1 & +1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & +1 & +1 & +1 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ +1 & -\sqrt{2} & 0 & +2 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & +\sqrt{2} & 0 & +2 & 0 \\ +1 & +\sqrt{2} & 0 & +2 & 0 & 0 \\ +1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & +2 & 0 \end{bmatrix}$$

3.5.2.4. Estimativa do erro experimental

O erro experimental foi obtido através do cálculo da variância e do desvio padrão dos valores obtidos no ensaio com o três fatores em nível “0”, correspondente aos ensaios 9, 10 e 11 da Tabela 7, acrescidos das variâncias de todos os demais valores, sendo que todas as combinações de níveis, descritas na mesma tabela, foram levantadas com cinco repetições.

3.5.2.5. Modelo estatístico

Deste modo o modelo matemático empírico foi dado por:

$$\hat{y}(x_1, x_2) = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{11} X_1^2 + b_{22} X_2^2 + b_{12} X_1 X_2 \quad (7)$$

3.5.2.6. Cálculo dos coeficientes b_n

Da mesma forma, o cálculo dos coeficientes do modelo matemático empírico pode ser determinado através da equação:

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

onde:

- $\mathbf{b}$ corresponde aos coeficientes do modelo matemático empírico;
- $\mathbf{X}$ corresponde a matriz dos coeficientes de contraste;
- $\mathbf{y}$ corresponde ao vetor coluna com os resultados dos experimentos.

3.5.3. Validação do modelo

A validação do modelo experimental obtido foi realizada por meio de uma análise de variância, por uma análise dos resíduos da estimativa e pelo coeficiente de determinação.

3.5.3.1. Coeficiente de determinação

O método utilizado para avaliar numericamente a qualidade do ajuste do modelo foi a avaliação do coeficiente de determinação.

O desvio de uma resposta individual em relação à média de todas as respostas observadas, $(y_n - \hat{y})$, pode ser decomposto em duas parcelas:

$$(y_n - \hat{y}) = (\hat{y}_n - \bar{y}) + (y_n - \hat{y}_n) \quad (9)$$

A primeira parcela, $(\hat{y}_n - \bar{y})$, representa o desvio da previsão feita pelo modelo para o ponto em questão, $\hat{y}_n$, em relação à média global, $\bar{y}$. A segunda parcela é a diferença entre o valor observado e o valor previsto. Num modelo bem ajustado esta diferença deve ser pequena.

O coeficiente de determinação, R^2 , pode ser calculado por:

$$R^2 = \frac{\sum (\hat{y}_n - \bar{y})^2}{\sum (y_n - \bar{y})^2} \quad (10)$$

O valor máximo que R^2 pode alcançar é 1, e só ocorrerá se não houver resíduo nenhum e, portanto, toda a variação em torno da média, dos valores obtidos nos ensaios experimentais, for explicada pelo modelo.

3.5.3.2. Análise de variância

A significância estatística da regressão pôde ser avaliada por uma análise de variância, ou seja, a análise de variância mostrou a existência, ou não, de uma relação entre a variável resposta, y , e os fatores escolhidos para a obtenção do modelo, X .

A análise de variância foi realizada computacionalmente utilizando-se o *software STATGRAPHICS Plus for Windows 4.1*.

A análise adotada foi a realizada pelo cálculo da estatística “F” considerando-se a razão entre a média quadrática da regressão, MQ_R , e a média quadrática dos resíduos, MQ_r .

A estatística “F” calculada foi comparada com a teórica para os graus de liberdade de MQ_R e de MQ_r , adotado um nível de significância estatística. A comparação pode ser realizada avaliando-se o Valor P obtido pelo *software*.

O nível de confiança adotado foi de 95%, deste modo, foi considerado como sendo estatisticamente significativos os fatores cujo Valor P mostrou-se muito superior a 0,05.

3.5.3.3. Distribuição dos resíduos:

O método utilizado para avaliar qualitativamente o ajuste do modelo foi a avaliação da distribuição dos resíduos das estimativas.

Os valores calculados da vazão volumétrica média para o modelo linear foram obtidos por:

$$\hat{y}(x_1, x_2) = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_2 & x_1 x_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_{12} \end{bmatrix} \quad (11)$$

onde $\hat{y}$ é o valor estimado da variável resposta e b_n são os coeficientes do modelo matemático.

Os valores calculados da vazão volumétrica média para o modelo quadrático foram obtidos por:

$$\hat{y}(x_1, x_2) = \begin{bmatrix} 1 & x_1 & x_2 & x_1^2 & x_2^2 & x_1 x_2 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \\ b_{11} \\ b_{22} \\ b_{12} \end{bmatrix} \quad (12)$$

Os resíduos puderam, então, ser calculados por:

$$e = y - \hat{y} \quad (13)$$

onde e , y e $\hat{y}$ são os vetores coluna representativos dos resíduos, dos valores observados experimentalmente e dos valores previstos, respectivamente.

Posteriormente, os erros foram graficados contra os resultados obtidos nos ensaios e analisado seu padrão de distribuição. Caso os resíduos das estimativas se apresentassem pequenos e seu padrão de distribuição se apresentasse aleatório, poderia ser considerado que os valores observados estão bem representados pelo respectivo modelo experimental.

Para evitar que os dados utilizados na análise se tornassem “viciados” descrevendo apenas a realidade observada durante os ensaios de obtenção do modelo, foram realizados novos ensaios, com novos pontos, para a realização de uma análise complementar dos resíduos.

Em um dos novos ensaios fixaram-se três valores de pressão (50kPa, 75kPa e 100kPa), correspondentes aos níveis -1, 0 e +1 deste parâmetro. Para cada valor de pressão, a abertura da válvula foi excursionada do início ao final da sua faixa de operação, através de nove passos iguais. Cada ponto foi ensaiado com cinco repetições.

Da mesma forma, em outro dos novos ensaios foram fixados três valores de abertura (41,3%, 62,5% e 83,7%), correspondentes aos níveis -1, 0 e +1 deste parâmetro. Similar ao ensaio anterior, a válvula foi excursionada na sua faixa de operação de pressão, através de oito passos iguais. Cada ponto foi ensaiado com cinco repetições.

3.6. Infra-estrutura para ensaio do protótipo

Para agilizar os ensaios experimentais e garantir uma boa repetitividade na sua realização, foi desenvolvida uma infra-estrutura para eles fossem realizados de forma automatizada. A Figura 34 apresenta o diagrama esquemático da bancada de testes juntamente com a referida infra-estrutura.

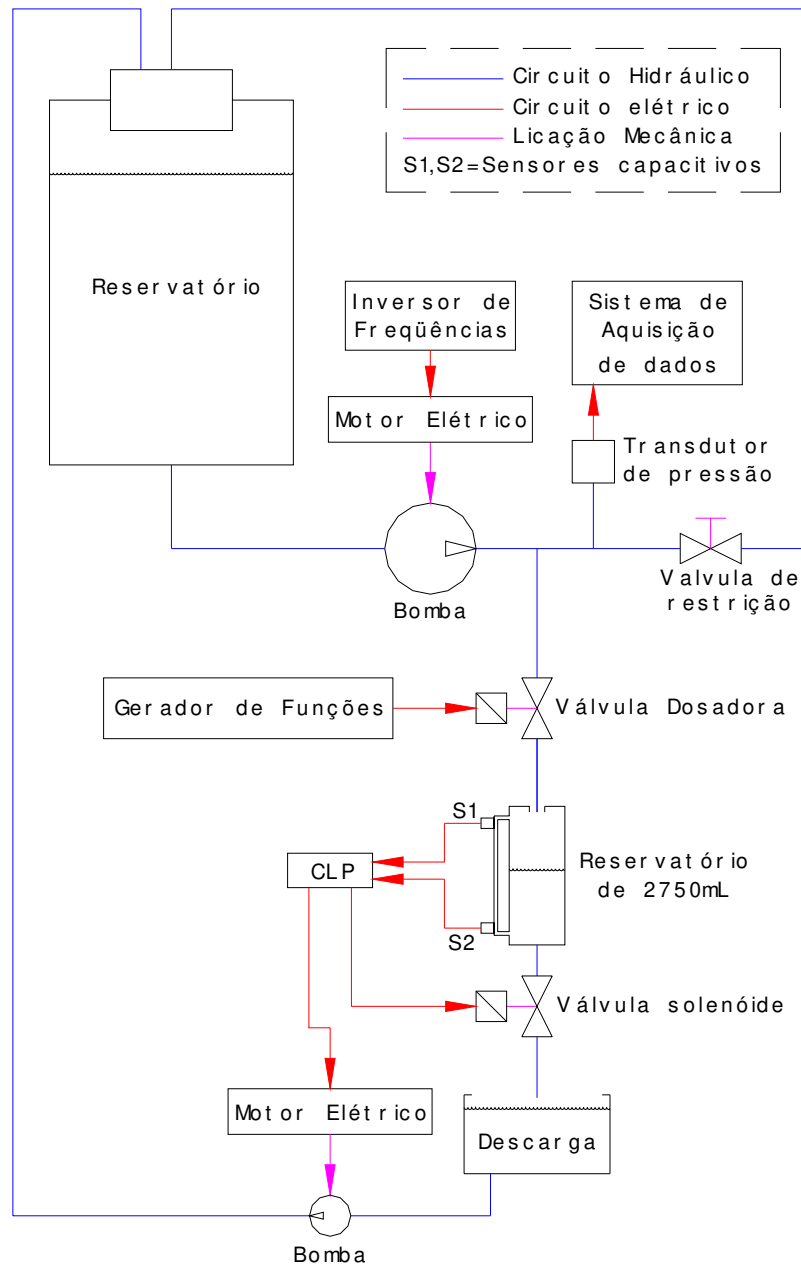


Figura 34 - Diagrama esquemático da bancada de testes, incluindo a infra-estrutura de ensaios

Para a realização das medidas de vazão foi empregado um reservatório confeccionado em PVC, com capacidade para 2750mL, com visor de nível em vidro. Este reservatório possuía em suas extremidades superior e inferior uma tubulação de PVC de $\frac{3}{4}$ " na qual foram instalados sensores de presença capacitivos, marca Instrutech. Estes sensores acusavam os momentos em que o recipiente apresentava-se no seu nível mínimo ou máximo. O sinal

proveniente destes sensores era transmitido às entradas digitais de um CLP (controlador lógico programável), marca Altus, modelo Quark 801, equipado com 16 entradas e 16 saídas digitais, 4 entradas e 4 saídas analógicas. Uma programação feita no CLP, por meio do *software Altus MasterTool* versão 1.24, permitia a esse contar e registrar o tempo gasto para encher o reservatório de PVC. Quando cheio, o volume de líquido presente no reservatório era descarregado, por meio de uma válvula solenóide acionada automaticamente pelo CLP, em outro reservatório maior. O líquido presente neste reservatório maior era retornado aos tanques de polietileno do protótipo por meio de uma bomba centrífuga de baixa vazão também acionada pelo CLP e alimentada com uma tensão alternada monofásica de 220V.

O fornecimento do sinal de acionamento para os solenóides das válvulas dosadoras foi feito por intermédio de um gerador de funções, marca Agilent, modelo 3320A, sendo que este foi configurado para operar gerando sinais do tipo PWM. Este sinal gerado foi amplificado por meio de um *Driver* de Potência, circuito eletrônico operado por um conjunto de transistores de efeito de campo (FET) de alta corrente, que acionava diretamente a bobina do solenóide das válvulas, fornecendo uma tensão de 12Vdc, podendo ser operado por sinais PWM com frequências desde 10 hz até 500 hz.

O acionamento do servo-motor, utilizado na válvula dosadora desenvolvida, foi feito diretamente pelo gerador de funções, também configurado para gerar sinais PWM..

A variação do percentual do ciclo ativo do sinal PWM fornecido pelo gerador de funções, foi processada digitando-se diretamente no teclado numérico do aparelho o valor desejado.

As leituras da pressão na linha a jusante das válvulas dosadoras foram obtidas por intermédio de um transdutor de pressão, marca Novus, modelo MSP-300. Este transdutor transformava leituras de 0 a 25PSI, em valores de corrente de 4 a 20mA. Esses valores de correntes foram digitalizados por intermédio de sistema de aquisição de dados, marca HBM (Hottinger Baldwin Messtechnik), modelo MGCPlus geração 1, equipado com cartões para leitura de sinais de corrente ML01 e AP01, que os exibia em seu *display* na forma de valores de pressão em kPa, utilizando-se de uma escala programada em sua memória interna.

A alimentação de energia dos sensores capacitivos foi feita por intermédio de uma fonte de alimentação de 24Vdc, marca Nodaji, com capacidade para 5A.

A alimentação de energia do sensor de pressão pode ser fornecida a uma tensão variando entre 10 e 30Vdc. Esta alimentação foi proporcionada por um dos dois canais de uma fonte de alimentação programável, marca AMREL (Amerian Reliance), com capacidade para 2A, configurada para gerar uma tensão de 15Vdc, limitada a uma corrente de 0,02A, que é o consumo de corrente máximo do sensor. A escolha da tensão foi feita ao acaso. A razão pela escolha de uma fonte programável em lugar que qualquer outra opção deveu-se a estabilidade da tensão fornecida por esta, o que garantiria uma leitura com melhor qualidade.

A alimentação de energia da válvula solenóide, utilizada para a drenagem do reservatório de PVC, foi feita por intermédio de uma fonte de alimentação de 12Vdc, marca Lune, com capacidade para 10A.

A alimentação de energia do servo-motor foi feita por intermédio de um dos dois canais de uma fonte de alimentação programável, marca AMREL (Amerian Reliance), com capacidade para 2A, configurada para gerar uma tensão de 4,8Vdc, limitada a uma corrente de 0,5A.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Sistema de aplicação

Foi concebido um sistema de aplicação de fertilizantes líquidos capaz de controlar a aplicação de três concentrados diferentes, por meio de três circuitos hidráulicos independentes, obedecendo a um mapa de aplicação arquivado em um computador instalado no trator. Os três concentrados se combinarão de modo a suprir as necessidades localizadas de nitrogênio, fósforo e potássio de cada porção da área cultivada.

O mapa de aplicação a ser utilizado com este sistema deverá conter as recomendações de adubação para toda a área a ser adubada, sendo disponibilizadas na forma de um banco de dados. Este banco de dados por sua vez, irá relacionar as coordenadas geodésicas do terreno com a informação da quantidade necessária de cada concentrado a ser aplicado.

O computador irá operar conjuntamente com um receptor de GPS, que fornecerá ao mesmo a informação das coordenadas geodésicas de onde se encontra o equipamento de aplicação. O computador irá fornecer ao sistema de aplicação a taxa de aplicação, em volume por comprimento, de cada um dos três concentrados que deverão ser depositados no solo naquele momento.

Um controlador eletrônico receberá a informação do computador e, juntamente com a informação da velocidade de deslocamento do trator, fornecida diretamente pelo receptor de GPS, irá controlar cada uma das válvulas que regulam a vazão de concentrado aplicado no solo, de cada um dos circuitos hidráulicos. Para tanto, o controlador terá em sua memória as informações de calibração de cada uma das válvulas reguladoras de vazão presentes no sistema, ou válvulas dosadoras, como estas costumam ser denominadas.

Os três circuitos hidráulicos serão idênticos, cada um será composto de um reservatório, um filtro, uma bomba centrífuga, um manômetro e uma válvula reguladora de pressão.

A válvula reguladora de vazão será controlada eletricamente para a dosagem do fertilizante, dosando o fluxo do concentrado que será aplicado no solo.

Os amplificadores PWM, por sua vez, serão operados pelo controlador eletrônico. A Figura 35 ilustra o diagrama deste circuito hidráulico, juntamente com o circuito eletrônico.

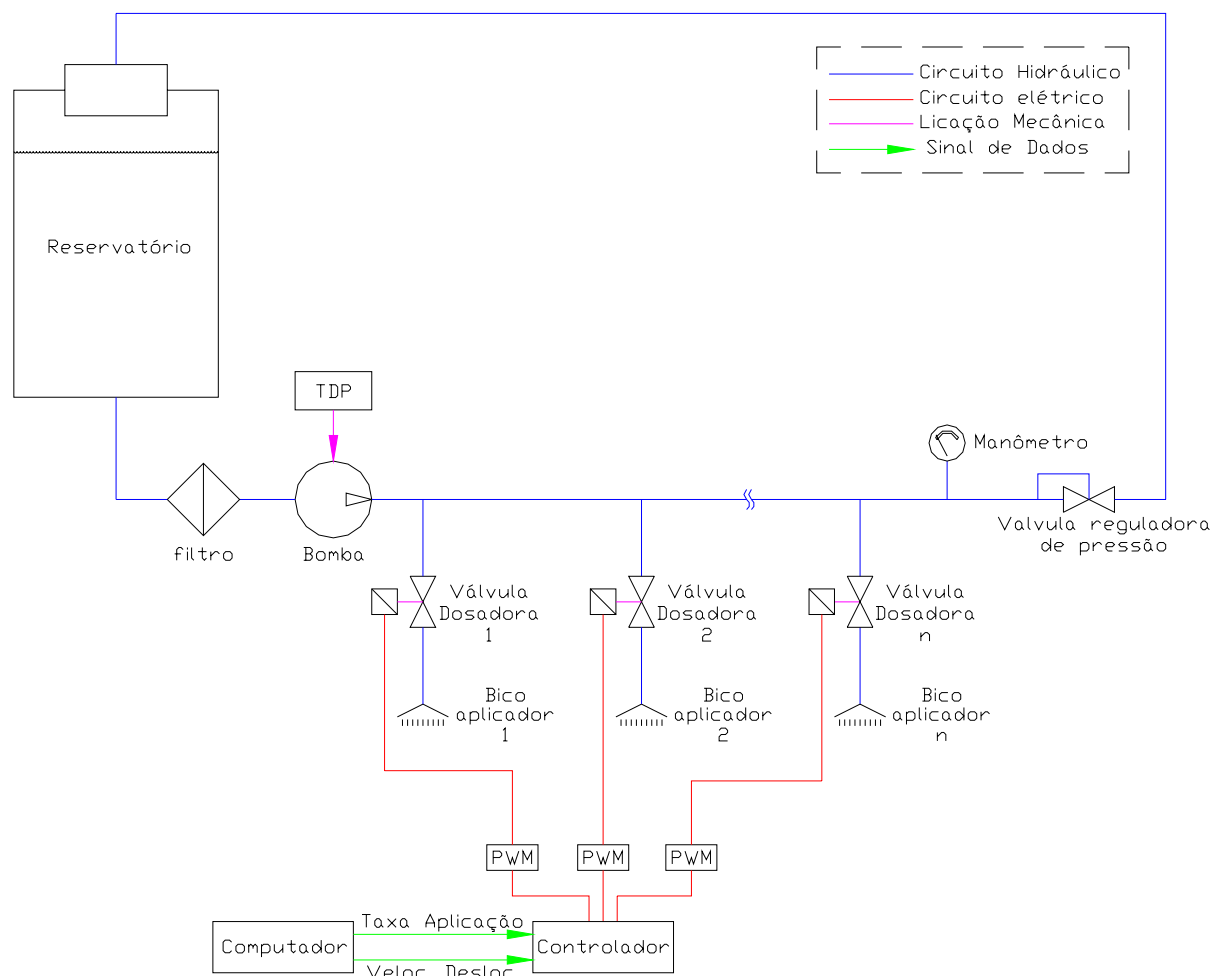


Figura 35 - Diagrama esquemático do circuito hidráulico responsável pela aplicação de um dos três concentrados, juntamente com o amplificador PWM

Neste circuito, a bomba centrífuga fornece pressão e vazão à linha de alimentação das válvulas. O acionamento da bomba será feito pela TDP (tomada de potência) do trator. A pressão na linha é mantida constante graças à atuação da válvula reguladora de pressão, ajustada manualmente com o auxílio do manômetro, que retorna o excedente da vazão do concentrado para o reservatório, proporcionando a sua agitação. O filtro tem a função de limitar o tamanho máximo do cristal que irá passar pela bomba e pelo restante da linha, bem como a de reter impurezas, evitando entupimento e desgaste prematuro das peças. O sinal de controle do controlador estabelece o percentual de abertura da válvula dosadora. A Figura 36 ilustra todo o sistema de aplicação.

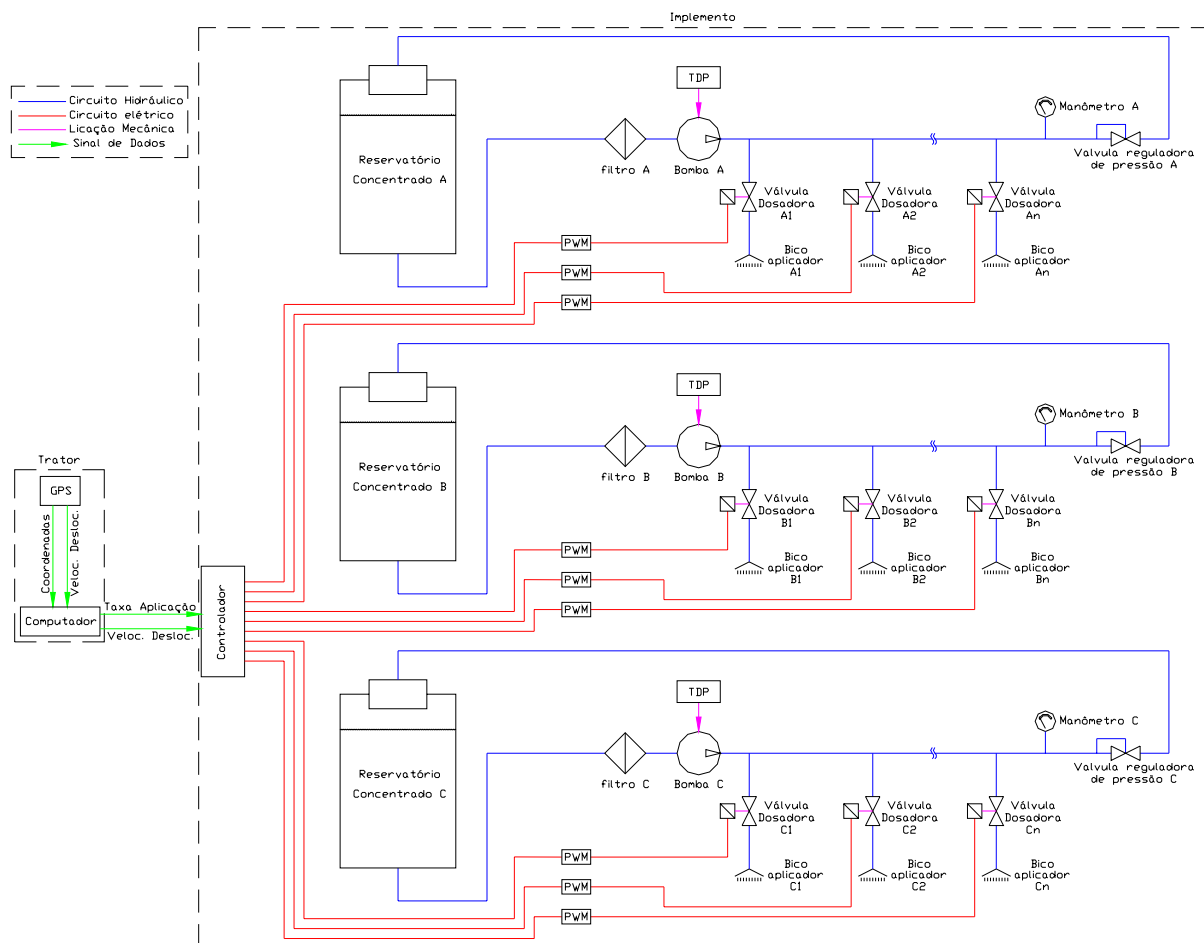


Figura 36 - Diagrama esquemático, com a visão geral do sistema de aplicação

A razão pela escolha de um sistema operando com bomba centrífuga, em lugar de uma aplicação empregando diretamente uma bomba peristáltica, de diafragma ou pistão, baseia-se no menor custo e na maior facilidade de aquisição dos componentes, uma vez que estes são comuns em outros tipos de equipamentos. A utilização de um sistema empregando uma bomba peristáltica também acarretaria nos problemas já descritos por BOARETO et al. (1991), baixa vida útil da mangueira e problemas na regularidade da vazão com o passar do tempo. Além destes problemas acrescenta-se o fato de apenas existirem bombas nacionais para faixas de vazão muito pequenas, inferiores às necessárias nesta aplicação, o que implicaria na importação de uma bomba mais adequada. Em relação à bomba de pistão, tem-se a questão da maior complexidade mecânica e do elevado custo de aquisição, fato que inviabiliza o seu uso; o mesmo ocorre com a bomba de diafragma. Quanto ao emprego de outros tipos de bombas,

como de engrenagens ou parafuso, este não foi cogitado, uma vez que na literatura não foram encontrados trabalhos com dados do seu comportamento.

O controlador irá operar com um algoritmo de controle em malha aberta, ou seja, sem ter o retorno da informação da vazão de fertilizante líquido que está realmente sendo aplicada. Tal decisão tem por base a limitação de precisão dos sensores convencionais, incapazes de efetuar leituras precisas em vazões muito inferiores à sua vazão nominal, além de problemas de desgaste e entupimentos decorrente das suspensões de fertilizantes. A utilização de sensores mais sofisticados é restringida pelo seu elevado custo e sensibilidade mecânica.

Para evitar que as variações da temperatura e das propriedades dos diferentes concentrados interfiram na precisão do sistema, o controlador possuirá uma rotina de ajuste de calibração do equipamento a qual deverá ser executada antes de cada operação no campo e após cada reabastecimento. Nesta rotina, as válvulas dosadoras serão acionadas fornecendo a metade da sua vazão máxima durante um período de 30s. A quantidade de concentrado fornecida por cada uma das válvulas dosadoras, durante esta operação, será armazenada em recipientes graduados. Esta graduação servirá para determinar o volume de concentrado depositado no interior do recipiente. A leitura do volume será transmitida ao controlador, via painel do próprio aparelho ou através de uma IHM (Interface Homem Máquina), que então utilizará a informação para ajustar a calibração da válvula correspondente. Esse procedimento será feito para cada uma das válvulas do sistema.

Considerando-se que o sistema deverá operar em malha aberta, a manutenção do circuito hidráulico a uma pressão constante tem por objetivo proporcionar uma situação mais controlada para a operação das válvulas que irão regular a vazão do concentrado, tornando a operação das mesmas mais simples e precisa.

4.2. Protótipo experimental

4.2.1. Descrição da Bancada de Testes Desenvolvida

Como pode ser observado no item 4.1, o circuito hidráulico é o mesmo para a aplicação de cada um dos três concentrados. Portanto, foi projetado apenas um destes circuitos, uma vez que os demais seriam iguais.

A construção da bancada de testes ocorreu nas dependências do Laboratório de Instrumentação e Controle (LIC) da Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas (FEAGRI / UNICAMP).

Esta bancada, ilustrada na Figura 37, é bastante semelhante ao circuito da Figura 17. A diferença está no fato deste operar com apenas uma válvula dosadora.

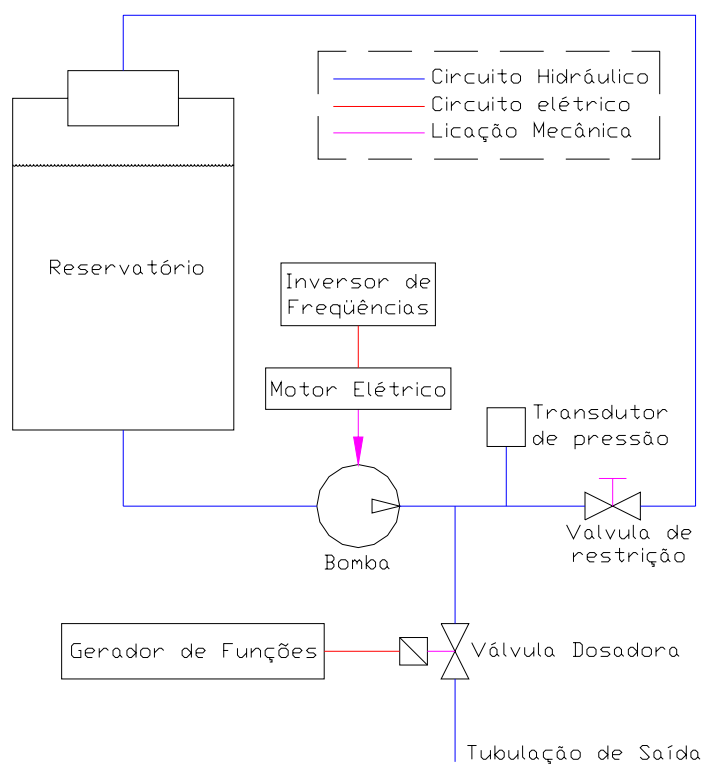


Figura 37 - Diagrama esquemático da bancada de testes desenvolvida

A bancada desenvolvida compõe-se de um reservatório de polietileno com água alimentando uma bomba centrífuga, marca RUDC, modelo RD-2, que proporciona pressão e vazão a uma linha hidráulica na qual está ligada a válvula dosadora, o fluxo d'água liberado por ela deixa o circuito, através de uma pequena tubulação de saída. A vazão excedente, não consumida pela válvula dosadora, retorna ao reservatório passando antes por uma válvula de restrição, cuja finalidade foi a de manter constante a pressão a montante da linha. O ajuste desta válvula de restrição foi feito manualmente, com auxílio da informação de pressão obtida por um transdutor de pressão e um sistema de aquisição de dados. No item 3.6 encontra-se o detalhamento desses dois equipamentos.

O sinal de controle da válvula dosadora é fornecido por um gerador de funções, conforme descrito no item 3.6.

O acionamento da bomba centrífuga foi feito por intermédio de um motor de indução trifásico de 373W alimentado por um inversor de frequências, marca Allen Braddley, modelo 160S-AA08NSF1, para motores de até 1,5kW, que permite variar a rotação deste.

4.2.2. Parâmetros de operação

O protótipo desenvolvido da válvula limita-se a operação com fertilizantes na forma de soluções. Devido à similaridade de características destes com as da água, torna-se possível avaliar o seu funcionamento utilizando apenas a água como fluido de trabalho. No entanto, também foi prevista a possibilidade de um uso futuro com três formulações de concentrados líquidos também na forma de suspensões, cada uma rica em um dos três macronutrientes primários. São elas:

- Uran, com 32% de N total;
 - o Composição: solução com 14% de NH_2 , 9% de NO_3 e 9% de NH_4 ;
 - o Densidade = 1350kg.m^{-3} ;
- Suspensão coloidal 10-30-0;
 - o Composição = fluoreto de amônio;
 - o Densidade = 1370kg.m^{-3} ;
- Suspensão de K_2O , 35%.
 - o Composição: de cloreto de potássio;
 - o Densidade = 1350kg.m^{-3} ;

Segundo BOARETO et al. (1991), estas são as matérias primas mais comumente utilizadas para a fabricação de fertilizantes líquidos. Todas elas foram caracterizadas conforme informações fornecidas pelos mesmos autores, e através de contato com o fabricante Serrana Fertilizantes S.A..

O projeto do protótipo experimental requer o conhecimento das vazões em que o sistema irá operar, quando em uma futura versão real. Uma vez que todas as válvulas, bem como todos os circuitos hidráulicos, serão iguais, o dimensionamento foi feito em função das exigências máximas e mínimas, independente do concentrado que será utilizado.

Para determinar estas vazões foi necessário o conhecimento das dosagens normalmente empregadas nas culturas. Para tanto, baseando-se nas informações constantes em RAIJ & QUAGGIO (1996), sintetizou-se numa tabela, apresentada no Anexo, as informações referentes às diversas culturas.

As faixas de vazão em que o sistema deve operar puderam ser obtidas por meio das informações contidas no Anexo, associadas às propriedades de cada concentrado (densidade, formulação).

Outra informação considerada foi o espaçamento máximo de cada cultura e a velocidade máxima de avanço do trator na operação de aplicação de fertilizante. A informação de espaçamento foi extraída de RAIJ & QUAGGIO (1996) e também se encontra no Anexo enquanto que a informação da velocidade máxima de aplicação foi obtida através de BOARETO et al. (1991), sendo que esta varia entre 0,833 e 1,667m.s⁻¹ para as condições usuais de dosagem.

Analisando-se ainda o Anexo, conjuntamente com a maior velocidade de aplicação da faixa definida no parágrafo anterior, obteve-se a maior demanda de massa de concentrado por unidade de tempo para aplicação de plantio do cloreto de potássio na cultura da cana-de-açúcar, isto é 50g.s⁻¹. Essa demanda também foi superior às demandas de nitrogênio e fósforo nesta mesma cultura e nas demais, tanto no plantio como na cobertura. A exceção foi para a cultura do café, que possui uma demanda bastante superior às demais culturas e não foi prevista neste projeto. No entanto, este sistema também poderia ser aplicado a esta cultura, desde que seja limitada a velocidade de aplicação à capacidade de vazão do mesmo.

Logo, considerando-se o um implemento em uma adubação de cobertura, deslocando-se a 1,67m.s⁻¹, em uma cultura de cana-de-açúcar, com um espaçamento de 1,5m, utilizando-se da maior demanda de nutriente para esta cultura (200kg.ha⁻¹ de K₂O, no plantio) à densidade de 1,35kg.L⁻¹ e concentração de 35%, estimou-se um consumo máximo de 106mL.s⁻¹ do concentrado em cada linha.

4.2.3. Dimensionamento da Bancada de testes

O reservatório foi dimensionado para armazenar quantidade suficiente de líquido para um ensaio de 600s. Com uma vazão de 106mL.s⁻¹ tem-se a necessidade de um estoque de 64L de concentrado.

A válvula reguladora de pressão operou inicialmente regulada para uma pressão de 75kPa. No entanto, foi previsto que ela possibilitasse regulagem para pressões mais elevadas, podendo alcançar 100kPa. Deste modo, pode-se obter a melhor combinação entre a pressão, vazão e abertura da válvula dosadora.

Em relação ao dimensionamento da bomba quando instalada em um sistema real.

- Conforme visto anteriormente, é necessário que a bomba centrífuga forneça 106mL.s^{-1} para garantir a aplicação do concentrado;
- É preciso garantir a recirculação de uma vazão de concentrado ao reservatório, que seja suficiente para manter a sua homogeneidade. Espera-se que a agitação seja possível recirculando-se todo o volume do reservatório em aproximadamente 10min. Logo, necessita-se que a bomba centrífuga forneça outros 166mL.s^{-1} para garantir a recirculação do fertilizante;
- Deve-se manter a linha a uma pressão superior a 75kPa acrescidos das perdas de carga presentes no circuito hidráulico.
- A bomba deve ser do tipo simples estágio e deverá operar com um rotor do tipo aberto. Conforme ULSO (2002) essa opção é a normalmente empregada; o uso do rotor aberto deve-se às suspensões que devido à existência de partículas sólidas provocaria maior desgaste, bem como possíveis incrustações nos canais.

Depois de construída, a bancada de testes serviu para a realização de todos os ensaios, desde a seleção, avaliação e validação de todas as válvulas potencialmente utilizáveis, até o levantamento e validação do modelo matemático da válvula dosadora definitiva, peça chave no funcionamento do sistema.

4.3. Seleção da válvula dosadora

Não foi encontrado na literatura técnica nenhuma publicação avaliando qual tipo de válvula era mais indicada para esta aplicação. Por isso, foi elaborada uma etapa detalhada de avaliação destas válvulas. Nesta fase, foram obtidos e avaliados os modelos de válvulas comerciais que potencialmente poderiam atender aos requisitos do sistema de aplicação ora em desenvolvimento.

4.3.1. Identificação das válvulas comerciais

Realizada uma consulta ao mercado obteve-se dois modelos de válvula iniciais para serem avaliados:

- Válvula 1
 - Marca: Asco;
 - Modelo: 8262C090;
 - Abertura e fechamento efetuados por intermédio de um obturador plano;
 - Acionamento por solenóide;
 - Tensão de trabalho: 12Vdc;
 - Potência consumida: 9,7W;
 - Tipo das roscas de entrada e saída: ¼” NPT.

- Válvula 2
 - Marca: Asco;
 - Modelo: 8210D95V;
 - Abertura e fechamento efetuados por intermédio de um diafragma;
 - Acionamento por solenóide;
 - Tensão de trabalho: 12Vdc;
 - Potência consumida 11,2W;
 - Tipo das roscas de entrada e saída: ¾” NPT.

4.3.2. Avaliação das válvulas comerciais

Foram realizados testes preliminares utilizando-se as válvulas obtidas, no intuito de avaliar o seu comportamento operando dentro do protótipo do sistema de aplicação.

Nestes testes observou-se uma grande dificuldade em se controlar, de forma satisfatória, o nível de abertura operado pelos solenóides, ainda que sinais de várias frequências tenham sido aplicados às válvulas, no intuito de uma melhoria na performance do sistema. Percebeu-se então, que o uso deste tipo de acionamento apresentaria sérios problemas operacionais.

Foram também consultadas válvulas com abertura e fechamento proporcionais, modelos tradicionalmente empregados na dosagem de líquidos. No entanto, não se encontrou um modelo que atendesse bem aos requisitos e que apresentasse um custo compatível.

Diante deste resultado, decidiu-se então partir para o desenvolvimento de uma válvula proporcional mais adequada a esta aplicação.

4.4. Desenvolvimento da servo-válvula dosadora

4.4.1. Projeto e construção

Para se preservar a proposta de baixo custo, optou-se pelo aproveitamento da base da eletro-válvula comercial, marca Asco, modelo 8262C090, utilizada nos ensaios anteriores, à qual foi adaptado um servo-motor do tipo empregado em aeromodelismo que responde a sinais digitais modulados por largura de pulso. Para tanto, foi necessário o desenvolvimento de um sistema mecânico de acoplamento da válvula ao servo-motor, bem como, o desenvolvimento de um circuito eletrônico de controle. O desenvolvimento de um controlador eletrônico comercial está sendo realizado pelo LIC/FEAGRI/UNICAMP.

Os sinais digitais fornecidos ao servo-motor apresentam um período de 17ms, e operam com uma tensão DC de 4,8V. O movimento angular do servo-motor processa-se de forma linear em relação à largura de pulso (*duty-cycle*) aplicada, compreendida na faixa de 0 a 2ms. Este servo-motor responde a esse sinal promovendo um movimento angular de 0 a 180°. O acionamento do servo-motor é feito por intermédio de um motor elétrico e um conjunto de engrenagens redutoras. O posicionamento angular é controlado por um circuito eletrônico dedicado já instalado no mesmo invólucro do servo-motor, o qual é realimentado com a informação da posição angular do seu eixo de saída, fornecida por intermédio de um potenciômetro linear angular.

A abertura a fechamento da válvula, com o conseqüente controle do fluxo, passou a ser feita por intermédio de um obturador cônico que avança contra a sede anelar da base da válvula. Para resistir aos efeitos de abrasão e corrosão promovidos pelos fertilizantes líquidos, o obturador foi fabricado em aço inoxidável.

O deslocamento deste obturador é feito por intermédio de uma base com uma rosca de fuso do tipo paralela com 2 entradas e passo de 4mm.

O outro fuso recebe o movimento angular do servo-motor por intermédio de um acoplamento com o motor.

A base do obturador tem o seu movimento angular bloqueado por dois parafusos guias os quais ficam presos a um suporte que também acomoda o fuso e o acoplamento com o motor.

Este suporte é rosqueado à base da válvula e também acomoda a chapa de suporte do servo-motor através da sua bucha de fixação.

Deste modo, o movimento angular do servo-motor faz com que a base do obturador reaja promovendo um movimento axial.

O dimensionamento da rosca do fuso levou em consideração o próprio diâmetro original do orifício anelar da base da eletro-válvula, de modo a permitir que a servo-válvula desenvolvida fosse capaz de proporcionar, quando totalmente aberta, a mesma vazão proporcionada pela eletro-válvula quando em sua montagem original. Tal dimensionamento resultou em um curso de 4mm, quando submetido a uma rotação de 180° proporcionada pelo servo-motor.

A vedação das partes da servo-válvula que entram em contato com o fluido de trabalho são feitas por intermédio de dois *O'Rings* e um anel de vedação, feito em aço inoxidável.

Para reduzir o custo de matéria prima e facilitar o processo de fabricação, apenas as partes em contato com o fluido de trabalho foram feitas de material resistente à abrasão e corrosão, ou seja, o obturador, a base da válvula e o anel de vedação. Os demais componentes foram fabricados em aço carbono ABNT 1045.

Na Figura 38 tem-se a vista em corte desta válvula.

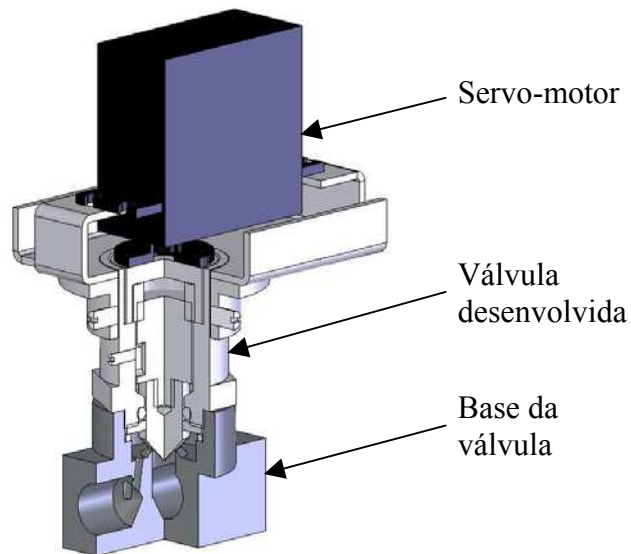


Figura 38 - Vista em corte do primeiro protótipo da servo-válvula dosadora desenvolvida

A servo-válvula desenvolvida apresenta uma grande quantidade de componentes. Tal característica se deve a intenção que se teve de facilitar o seu desenvolvimento. Tal iniciativa tornaria mais fácil a substituição de um eventual componente, por uma atualização do mesmo, caso fossem necessárias correções no projeto. Logo, é possível reduzir o número de componentes eliminando-se esta característica, conseqüentemente simplificando o processo de fabricação quando em uma versão comercial, o que reduz o seu custo.

Para reduzir os problemas de entupimento, tanto o orifício da válvula quanto a extremidade da agulha apresentam forma cônica, o que forma apenas uma linha de contato entre os dois componentes quando a servo-válvula está completamente fechada. No entanto, esta alternativa apresentou problemas no fechamento total da mesma, a qual ainda apresenta um pequeno fluxo remanescente.

4.4.2. Avaliação preliminar e correções

No ensaio com o primeiro protótipo da servo-válvula obteve-se a curva descrita na Figura 39. Cada nível de abertura e fechamento foi levantado com três repetições, as quais estão descritas no gráfico.

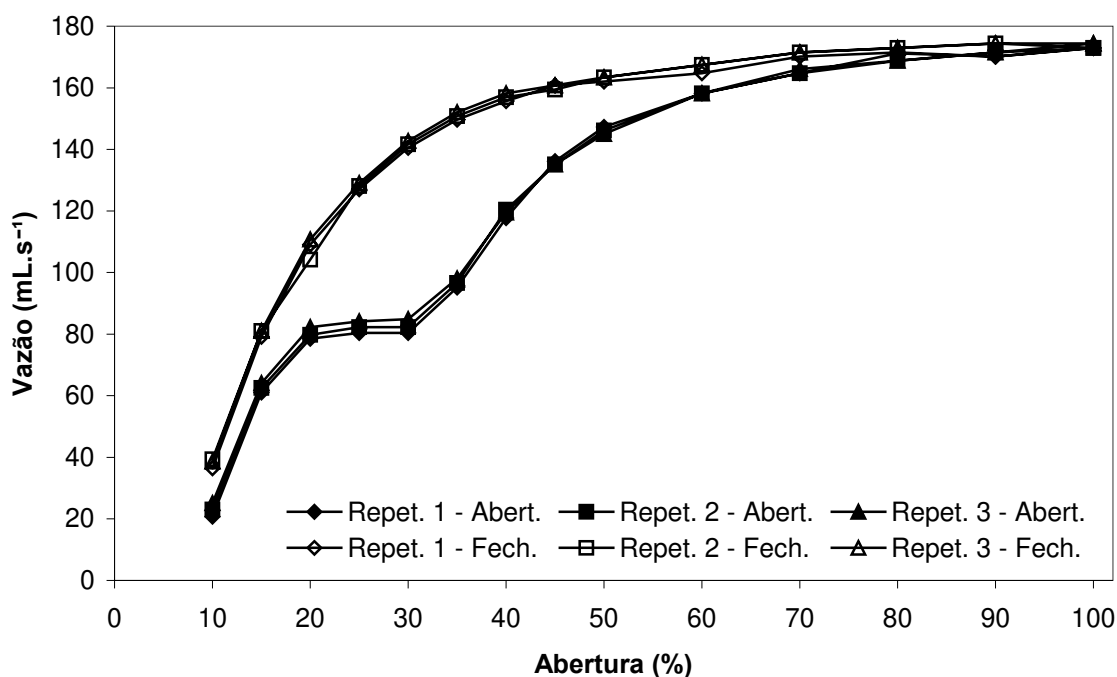


Figura 39 - Ensaio com o primeiro protótipo da servo-válvula dosadora desenvolvida, pressão de 100 kPa, operação de abertura e fechamento

O primeiro protótipo da servo-válvula apresentou problemas de elevada não-linearidade nas operações de abertura, o que inicialmente inviabilizaria o seu emprego neste tipo de operação. Além disso, pôde-se observar problemas de baixa repetitividade o que também comprometia a sua precisão.

Dentre as hipóteses levantadas, a de que uma possível folga no fuso, resultante das tolerâncias no processo de usinagem, poderia estar provocando tal comportamento foi logo averiguada. Com o ensaio realizado para verificar a existência desta folga, obteve-se o deslocamento do obturador cônico em mm. Os resultados encontram-se descritos na Figura 40.

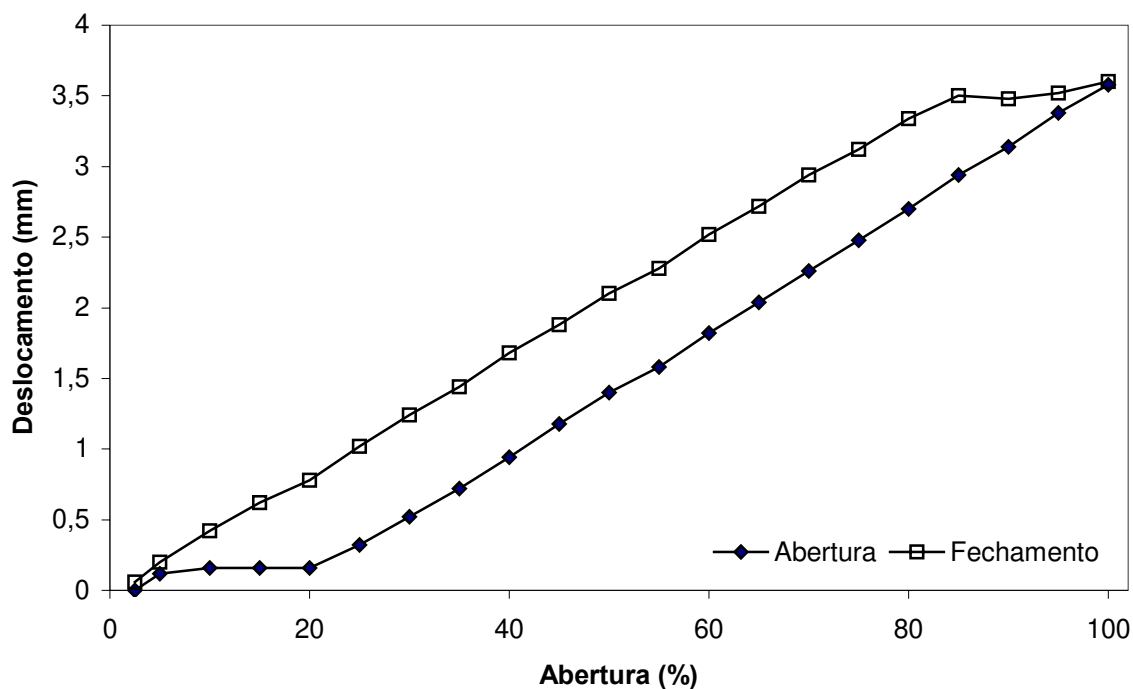


Figura 40 - Gráfico do ensaio de avaliação da folga na rosca do fuso da servo-válvula dosadora desenvolvida

Analisando-se o gráfico confirmou-se a existência de folgas entre as roscas do fuso, as quais podem ser observadas pelos trechos horizontais presentes nas curvas do gráfico da Figura 40.

A alternativa adotada para reduzir o efeito da folga no fuso da rosca consistiu na inclusão de uma mola pressionando este fuso, de modo que o deslizamento da rosca ocorresse em apenas uma de suas faces. Para tanto, a constante de elasticidade da mola foi determinada de modo a sobrepor a força efetuada pela pressão do fluido sobre o obturador cônico quando a mola está na sua posição menos comprimida.

Na Figura 41 tem-se a vista em corte da servo-válvula após a instalação da mola.

O desenho de conjunto, com as respectivas cotas, encontra-se no Apêndice deste trabalho.

Na Figura 42 tem-se uma vista em explosão com a denominação dos componentes.

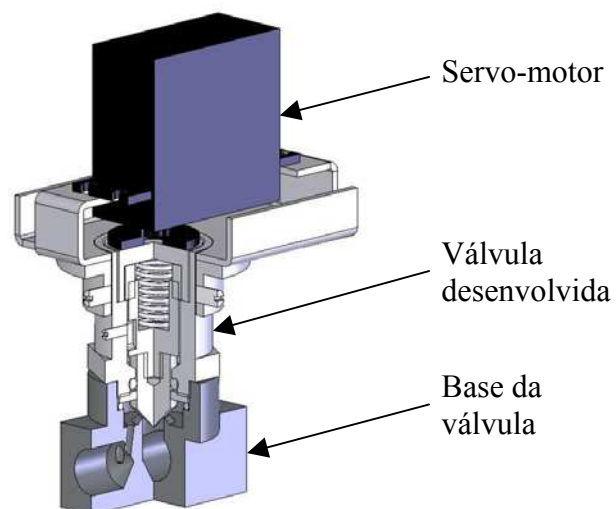


Figura 41 - Vista em corte da servo-válvula dosadora desenvolvida após implementadas as correções

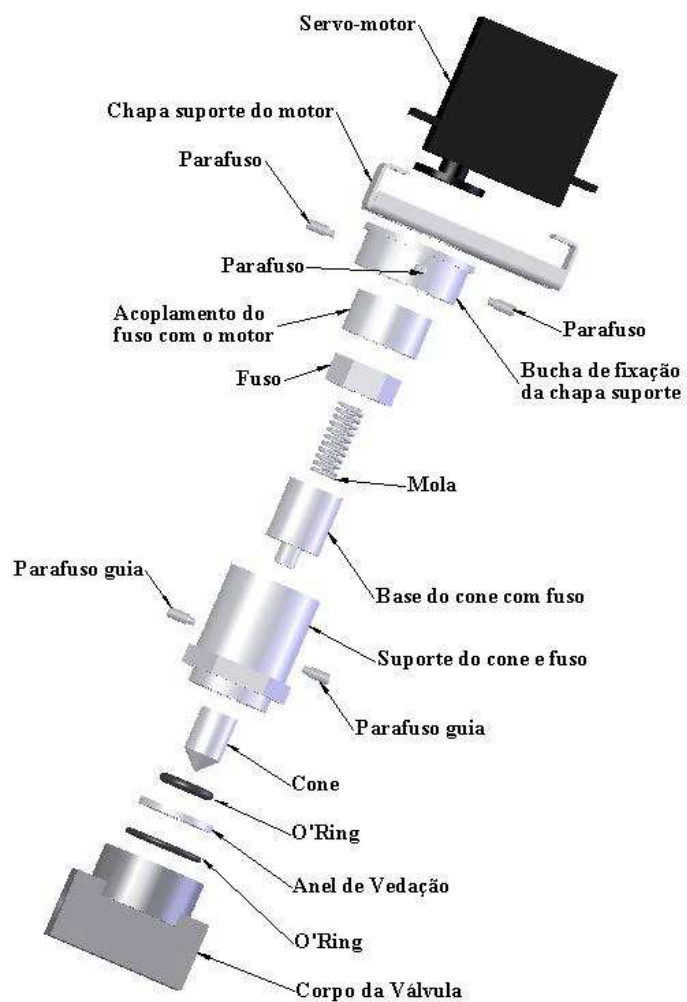


Figura 42 - Vista em explosão da servo-válvula dosadora desenvolvida

4.4.3. Avaliação final

Nos ensaios com o protótipo final da servo-válvula foram obtidas as curvas descritas na Figura 43, para a operação de abertura às pressões de 50 kPa e 100 kPa. Todos os ensaios também foram realizados com três repetições, as quais também são apresentadas nos gráficos.

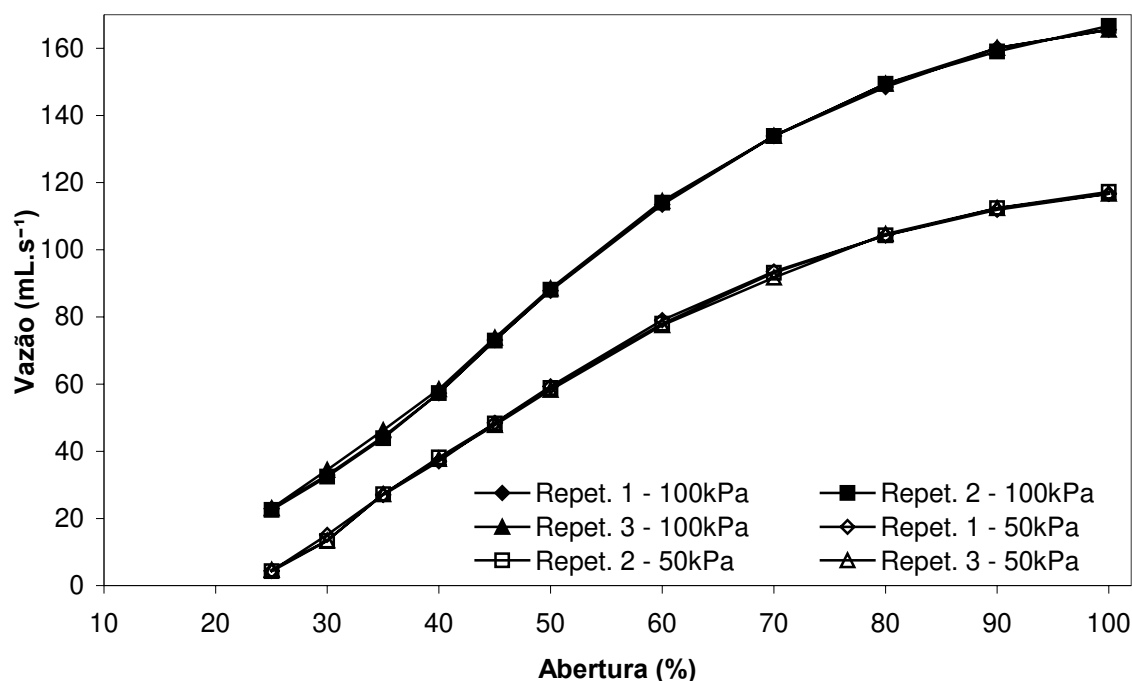


Figura 43 - Ensaio com o segundo protótipo da servo-válvula dosadora desenvolvida em operações de abertura

Durante a realização dos ensaios, notou-se que a válvula só apresentou um valor efetivo de vazão para aberturas a partir de 25%, durante as operações de abertura, razão pela qual o gráfico só começa a mostrar valores a partir desse ponto.

Os ensaios com o protótipo final também obtiveram as curvas descritas na Figura 44, para as operações de fechamento, às pressões de 50 kPa e 100 kPa.

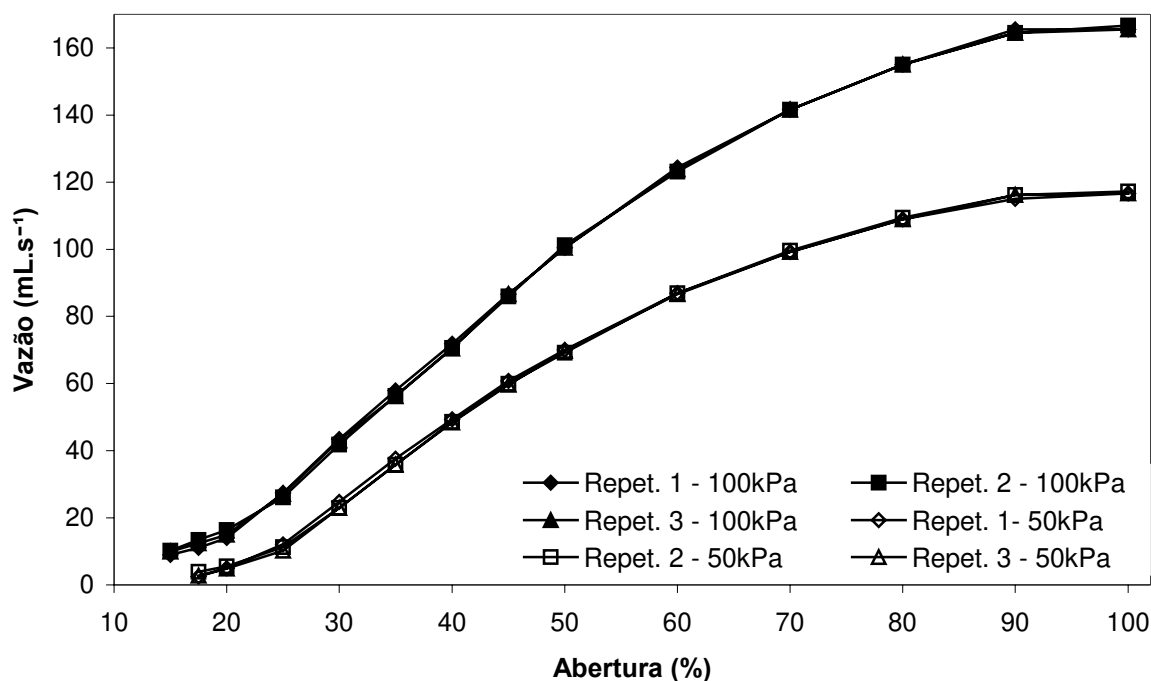


Figura 44 - Ensaio preliminar da servo-válvula dosadora desenvolvida em operações de fechamento

Nas operações de fechamento, devido ao efeito de histerese, puderam-se observar valores de vazão em aberturas inferiores a 25%.

Conforme pode ser observado, há a presença de uma inflexão nas curvas para valores de abertura abaixo de 25%, o que faz com que estes não sejam bem descritos através de uma função polinomial quadrática. Além disso, observa-se uma perda de repetitividade neste intervalo, o que pode ser um problema visto que este erro representa um razoável percentual da vazão liberada pela servo-válvula a esta abertura. Por este motivo optou-se por descartar a utilização da servo-válvula em aberturas inferiores a 25%.

Os ensaios finais, com o protótipo final da servo-válvula, obtiveram os resultados descritos na Tabela 9 e as curvas de vazão em função do percentual de abertura, nas operações de abertura e fechamento, para uma pressão de 100 kPa, mostradas na Figura 45.

Tabela 9 - Resultados dos ensaios finais da servo-válvula dosadora desenvolvida a 100kPa

Abertura (%)	Ascend. (mL.s ⁻¹)	Descend. (mL.s ⁻¹)	Ascend. (mL.s ⁻¹)	Descend. (mL.s ⁻¹)	Ascend. (mL.s ⁻¹)	Descend. (mL.s ⁻¹)	Méd.Geral (mL.s ⁻¹)	Repet. (%)	Histerese (%)	Não Lin. (%)
25	15,351	23,135	14,732	21,739	15,049	23,091	18,850	0,82	4,45	8,24
30	32,450	41,880	33,981	40,230	32,580	41,809	37,155	0,96	4,85	3,93
35	48,708	58,333	49,595	57,243	48,805	59,036	53,620	1,05	5,36	0,74
40	60,945	75,153	61,713	73,134	61,558	75,851	68,059	1,59	7,78	0,30
45	76,087	90,406	77,044	89,091	76,563	90,741	83,322	0,96	7,90	2,98
50	90,406	103,376	91,078	102,083	90,406	103,376	96,787	0,75	7,20	5,01
60	115,023	126,289	116,114	125,000	113,953	126,943	120,554	1,26	6,45	6,90
70	134,615	144,970	135,359	143,275	135,359	144,118	139,616	0,99	5,26	6,27
80	150,307	157,051	151,235	156,051	151,235	158,065	153,990	1,18	3,58	3,15
90	163,333	170,139	163,333	167,808	163,333	167,808	165,959	1,36	3,07	1,97
100	171,329	171,329	171,329	171,329	170,808	170,808	171,155	0,30	0,00	9,76

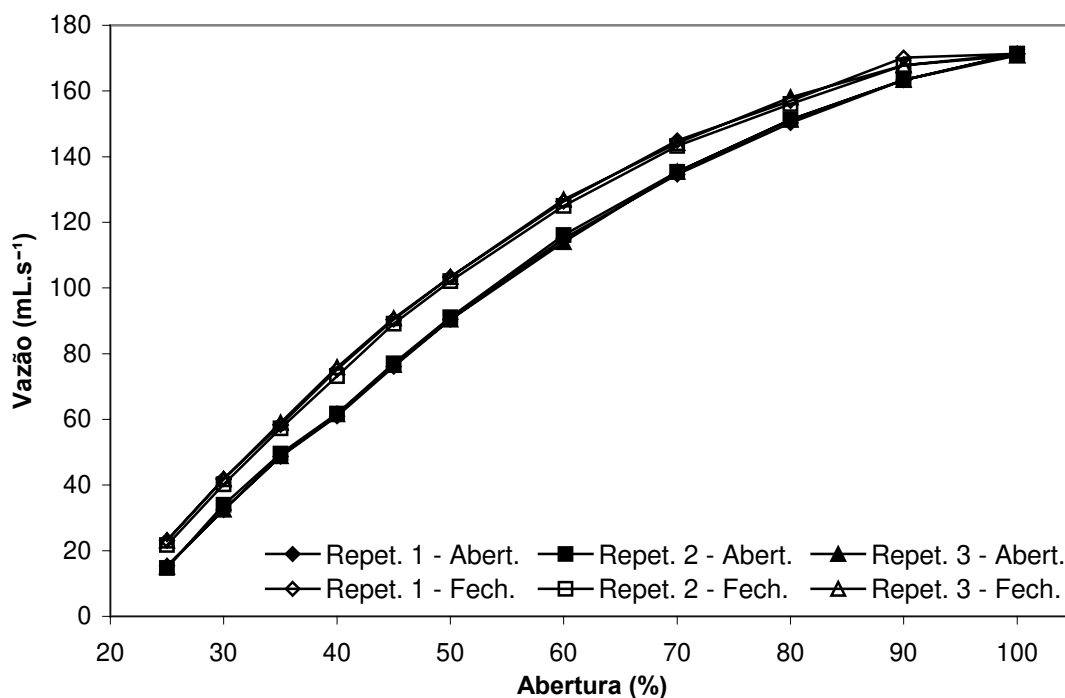


Figura 45 - Gráfico com os resultados dos ensaios finais com a servo-válvula dosadora desenvolvida, a uma pressão de 100 kPa

Analisando-se os dados da Tabela 9 e da Figura 45, nota-se que:

- a servo-válvula apresentou uma vazão nominal de 171,16mL.s⁻¹, e uma vazão mínima de 18,85 mL.s⁻¹, a pressão de trabalho de 100kPa;

- a pior situação quanto à repetitividade, ocorreu a uma abertura de 40%, nas operações de fechamento, sendo de 1,59% da vazão máxima;
- a pior situação quanto à histerese, ocorreu a uma abertura de 45%, sendo de 7,90%;
- a distribuição dos erros de não linearidade, bem como a forma da curva obtida, evidenciam um comportamento quadrático.

Os ensaios finais, com o protótipo final da válvula, também obtiveram os resultados descritos na Tabela 10 e as curvas de vazão em função do percentual de abertura, mostradas na Figura 46, para uma pressão de 50 kPa.

Tabela 10 - Resultados dos ensaios finais da servo-válvula dosadora desenvolvida a 50kPa

Abertura (%)	Ascend. (mL.s⁻¹)	Descend. (mL.s⁻¹)	Ascend. (mL.s⁻¹)	Descend. (mL.s⁻¹)	Ascend. (mL.s⁻¹)	Descend. (mL.s⁻¹)	Méd. Geral (mL.s⁻¹)	Repet. (%)	Histerese (%)	Não Lin. (%)
25	4,427	12,099	4,265	11,233	4,698	10,208	7,822	1,62	5,75	7,67
30	15,096	24,798	13,308	22,983	13,462	22,962	18,768	1,57	8,24	6,23
35	27,042	37,634	27,283	35,819	27,222	35,819	31,803	1,55	7,91	1,60
40	37,065	49,395	38,162	48,611	37,750	48,419	43,234	0,94	9,54	0,67
45	48,515	60,794	48,323	59,902	47,852	59,611	54,166	1,01	10,16	3,03
50	59,322	70,000	58,894	69,209	58,333	69,801	64,260	0,85	9,26	5,43
60	79,032	86,879	78,025	86,879	77,532	86,572	82,487	1,28	7,34	8,61
70	93,511	99,190	93,156	99,593	91,760	99,190	96,067	1,50	5,58	7,74
80	104,255	108,889	104,255	109,375	104,701	108,889	106,727	0,42	3,98	4,28
90	111,872	115,023	112,385	116,114	112,385	116,114	113,982	0,93	3,03	2,41
100	116,667	116,667	117,225	117,225	116,667	116,667	116,853	0,48	0,00	11,82

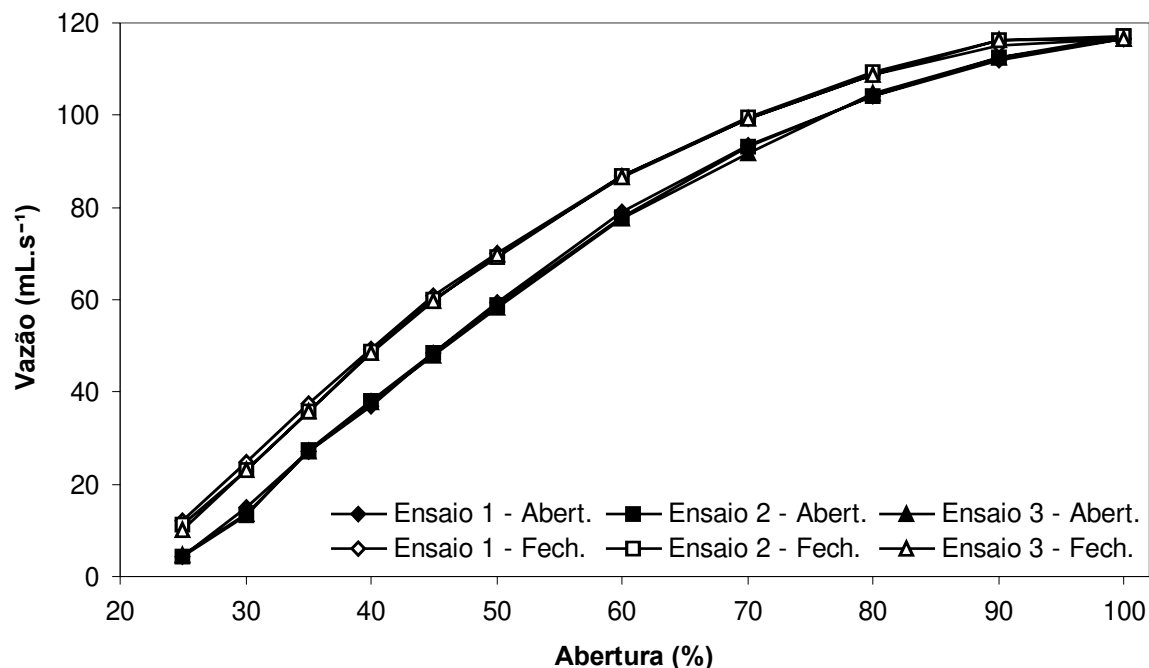


Figura 46 - Gráfico dos resultados dos ensaios finais com a servo-válvula dosadora desenvolvida, a uma pressão de 50 kPa

Analisando-se os dados da Tabela 10 e da Figura 46, nota-se que:

- a válvula apresentou uma vazão nominal de $116,85 \text{ mL.s}^{-1}$ e uma vazão mínima de $7,82 \text{ mL.s}^{-1}$, a pressão de trabalho de 50kPa;
- a pior situação quanto à repetitividade ocorreu a uma abertura de 25%, nas operações de fechamento, sendo de 1,62% da vazão máxima;
- a pior situação quanto à histerese, ocorreu a uma abertura de 45%, sendo de 10,16%;
- a distribuição dos erros de não linearidade, bem como a forma da curva obtida nestes ensaios, também evidenciam um comportamento quadrático.

Utilizando-se os valores médios das curvas correspondentes aos três ensaios, conforme metodologia proposta por NETO et al. (2002), obtiveram-se as funções polinomiais com os seus respectivos coeficientes de ajuste R^2 , os quais encontram-se descritos, juntamente com as curvas respresentativas destas funções, na Figura 47.

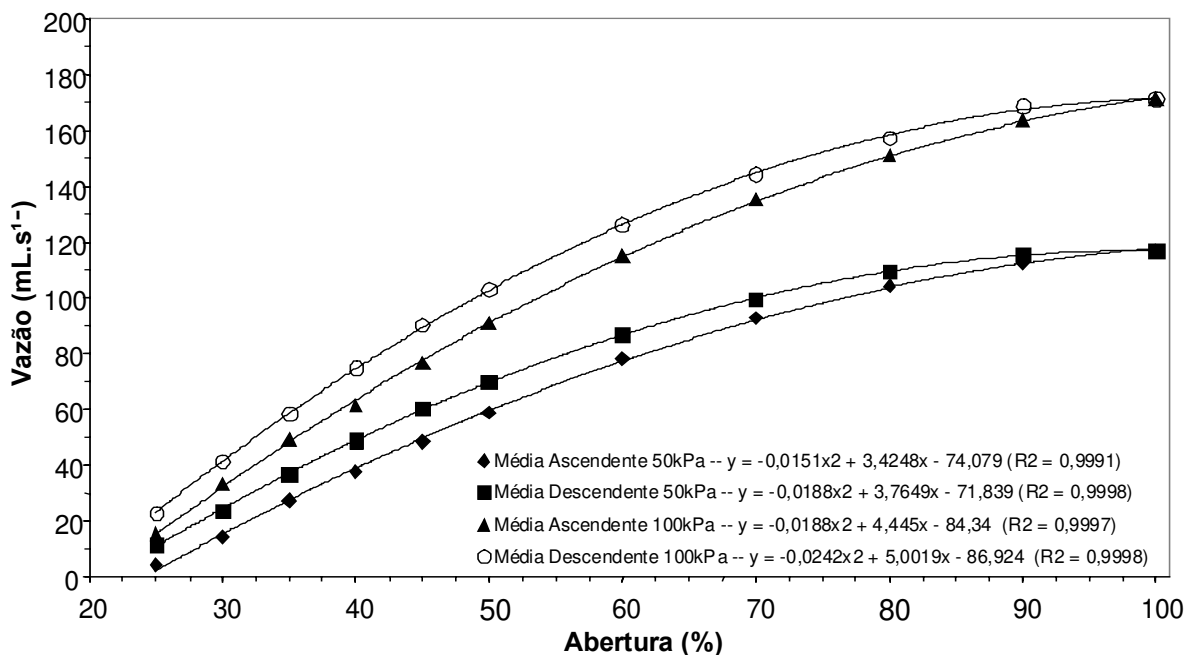


Figura 47 - Dados médios com as respectivas funções polinomiais e curvas de ajuste quadráticas

Nota-se pela Figura 47 o efeito da não linearidade e da histerese nos dois níveis de pressão estudados.

Os coeficientes de determinação R^2 obtidos para as funções quadráticas ajustadas obtidas para cada uma das curvas e descritas na Figura 47, indicam ser verdadeira a hipótese da válvula desenvolvida apresentar um comportamento quadrático da sua vazão de saída em relação ao seu percentual de abertura.

A válvula apresentou limitação quanto a sua faixa de utilização, o que, conseqüentemente, limitou as suas vazões mínimas. No entanto, essa válvula pode ser reprojeta, alterando as suas dimensões para operar em diferentes faixas de vazão.

4.5. Modelo matemático completo da válvula dosadora

Foram obtidos e validados os modelos multifatorial linear e multifatorial quadrático que descrevem o comportamento da vazão obtida pela válvula variando-se a sua abertura e a pressão na linha a montante da mesma.

Tendo-se em vista eliminar o comportamento de histerese da válvula constatado no item 4.4.3, em todos os ensaios a partir daqui, esta foi somente operada em ciclos de abertura, desde a obtenção do modelo até a sua total validação. Tal forma de operação pode ser facilmente implementada no *software* do controlador que irá controlar as válvulas dosadoras, quando no modelo real.

4.5.1. Levantamento do modelo matemático linear

Em uma primeira abordagem descreveu-se o comportamento da válvula, em função de sua abertura e da pressão de trabalho, por meio de um modelo matemático linear. Para tanto foi adotado o planejamento de ensaio descrito na Tabela 4. Deste modo, efetuando-se os ensaios com cinco repetições, e atentando-se a todos os procedimentos para garantir a aleatoriedade dos ensaios, obtiveram-se os dados descritos na Tabela 11.

Tabela 11 - Dados obtidos no ensaio com o planejamento multifatorial 2²

Item	Abertura (nível)	Pressão (nível)	Abertura (%)	Pressão (kPa)	Vazão1 (mL.s ⁻¹)	Vazão 2 (mL.s ⁻¹)	Vazão 3 (mL.s ⁻¹)	Vazão 4 (mL.s ⁻¹)	Vazão 5 (mL.s ⁻¹)
1	-1	-1	41,3	50	34,12	30,59	28,29	31,04	30,29
2	1	-1	83,7	50	103,38	104,96	104,56	104,96	104,96
3	-1	1	41,3	100	46,45	51,31	44,28	46,93	47,09
4	1	1	83,7	100	153,63	153,63	152,78	153,63	152,78
5	0	0	62,5	75	95,16	93,54	91,06	95,16	91,06
6	0	0	62,5	75	94,50	89,87	93,86	95,49	89,58
7	0	0	62,5	75	94,83	95,16	96,15	94,50	94,83

Com estes dados obteve-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação para cada combinação de níveis do ensaio, os quais estão descritos na Tabela 12.

Tabela 12 - Resumo estatístico dos resultados do ensaio

Item	Abertura (nível)	Pressão (nível)	Abertura (%)	Pressão (kPa)	Média y (mL.s ⁻¹)	s (mL.s ⁻¹)	CV(%)
1	-1	-1	41,3	50	30,87	2,10	6,81
2	1	-1	83,7	50	104,57	0,68	0,65
3	-1	1	41,3	100	47,21	2,55	5,40
4	1	1	83,7	100	153,29	0,47	0,30
5	0	0	62,5	75	93,19	2,06	2,21
6	0	0	62,5	75	92,66	2,74	2,96
7	0	0	62,5	75	95,09	0,64	0,67

Também foi possível determinar o erro experimental $s = 1,84\%$.

Utilizando-se dos valores estabelecidos para os níveis de cada um dos dois fatores, constante na Tabela 12 obtém-se:

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

Resolvendo-se a Equação 6, obteve-se:

$$b = \begin{bmatrix} 88,126 \\ 44,944 \\ 16,268 \\ 8,095 \end{bmatrix}$$

Portando, o modelo matemático empírico codificado descrito pela Equação 5 passa a ser:

$$\hat{y}(x_1, x_2) = 88,126 + 44,944X_1 + 16,268X_2 + 8,095X_1X_2 \quad (14)$$

onde:

– $\hat{y}$ corresponde a vazão volumétrica prevista pelo modelo, em mL.s⁻¹;

- x_1 corresponde ao nível de abertura;
- x_2 corresponde ao nível da pressão de trabalho.

Como no ensaio de resíduos complementar foram utilizados valores de abertura e pressão diferentes dos definidos para a obtenção do modelo matemático, na análise destes torna-se mais interessante que a equação do modelo apresente coeficientes em termos dos valores físicos, em substituição aos valores codificados.

Deste modo, substituindo na Equação 14 os termos:

$$X_1 = \left(\frac{A - \left(\frac{83,7 + 41,3}{2} \right)}{\frac{83,7 - 41,3}{2}} \right)$$

$$X_2 = \left(\frac{P - \left(\frac{100 + 50}{2} \right)}{\frac{100 - 50}{2}} \right)$$

Obtém-se o modelo decodificado:

$$\hat{y}(A, P) = -21,59 + 0,9746A - 0,3038P + 0,01527AP \quad (15)$$

onde:

- $\hat{y}$ corresponde a vazão volumétrica prevista pelo modelo, em mL.s⁻¹;
- A corresponde ao percentual de abertura;
- P corresponde à pressão de trabalho em kPa.

Construindo-se a superfície de resposta descrita pela equação do modelo matemático codificado, conjuntamente com os pontos amostrados pelo ensaio, utilizando-se o *software STATGRAPHICS Plus*, tem-se o gráfico em curvas de nível, descrito na Figura 48.

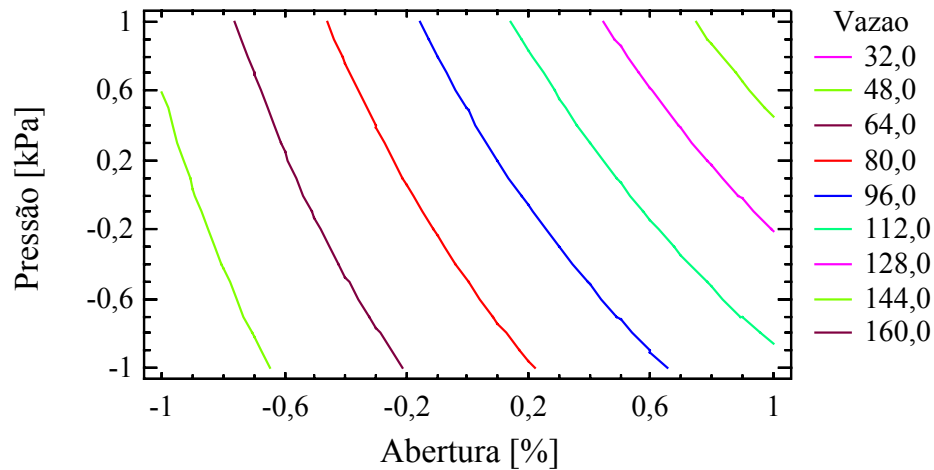


Figura 48 - Gráfico com a superfície de resposta do modelo matemático linear, descrito na forma de curvas de nível

4.5.2. Validação do modelo matemático linear

A validação do modelo matemático linear foi realizada por meio do cálculo do coeficiente de determinação, da análise de variância e da análise da distribuição dos resíduos da estimativa.

4.5.2.1. Coeficiente de determinação

Resolvendo-se a Equação 10, obteve-se:

$$R^2 = 0,9810$$

Logo, pode-se afirmar que o modelo matemático adotado ajusta bem os valores utilizados para a sua obtenção.

4.5.2.2. Análise de variância

A avaliação estatística da regressão realizada para a obtenção do modelo multifatorial linear, foi realizada com o auxílio do *software STATGRAPHICS Plus* e está descrita na Tabela 13.

Tabela 13 - Análise de variância para o modelo linear

Fonte de Variação	Soma Quadrática	No de graus de liberdade	Média Quadrática	Razão F	Valor P
Regressão: X_1	40399,3	1	40399,3	10869,90	0,0000
Regressão: X_2	5292,96	1	5292,96	1424,13	0,0000
Regressão: $X_1.X_2$	1310,58	1	1310,58	352,63	0,0000
Falta de Ajuste	801,008	1	801,008	215,52	0,0000
Erro Puro	111,499	30	3,71662		
Total	47915,3	34			

$$R^2 = 98,0956\%$$

$$R^2 \text{ (ajustado para os graus de liberdade)} = 97,9113\%$$

$$\text{Erro Padrão da Estimativa} = 1,92785$$

Conforme observado na Tabela 13, todos os valores de P são muito menores que 0,05, valor abaixo do qual o F calculado é superior ao F tabelado em um nível de confiança de 95%. Isto significa que os efeitos dos coeficientes X_1 , X_2 e $X_1.X_2$ são altamente significativos e que nenhum deles deve ser desprezado. Também pode-se observar que a falta de ajuste do modelo é altamente significativa o que evidencia uma deficiência do modelo na descrição dos valores obtidos experimentalmente.

4.5.2.3. Análise da distribuição dos resíduos

Utilizando-se dos dados dos ensaios para a determinação do modelo foi obtido, com o *software STATGRAPHICS Plus*, o gráfico de distribuição de resíduos da Figura 49.

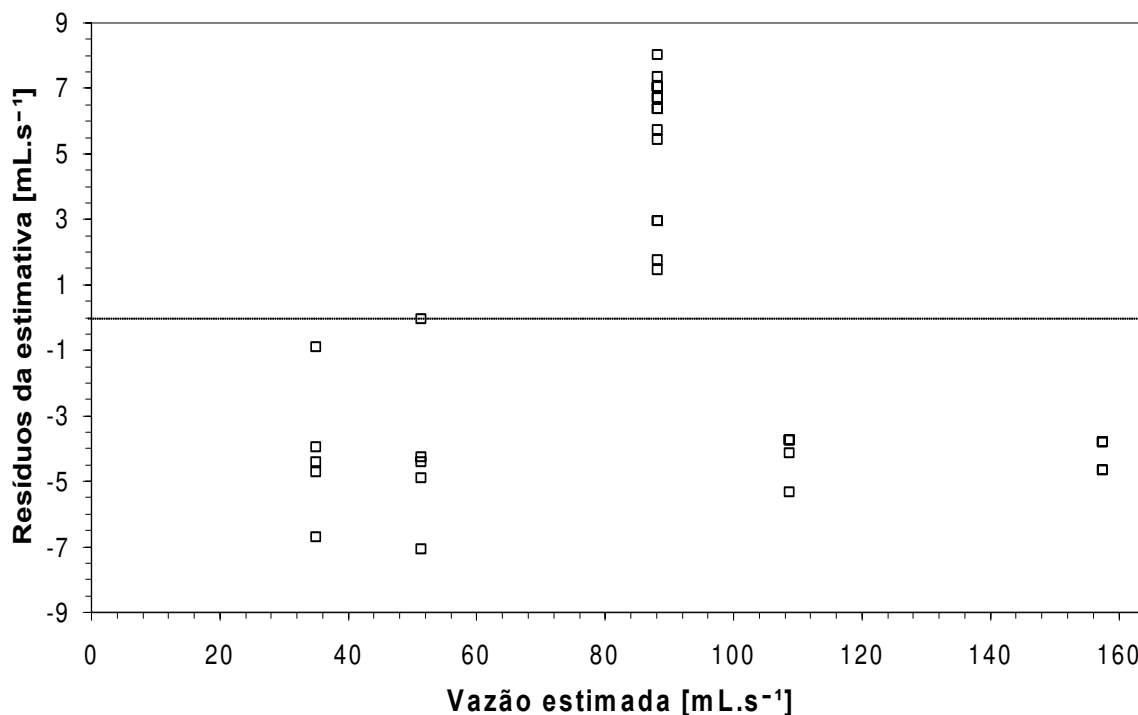


Figura 49 - Gráfico da distribuição dos resíduos da estimativa obtidos com os valores utilizados para o levantamento do modelo matemático linear

Na Figura 49 nota-se uma evidente presença de tendência nos valores dos resíduos, o modelo tende a subestimar os valores de vazão situados no centro da faixa de trabalho da válvula, bem como tende a superestimar os demais valores da vazão. Tal comportamento, aparentemente quadrático, evidencia uma deficiência no modelo linear.

Os dados referentes aos valores obtidos nos ensaios adicionais, específicos para a análise de resíduos complementar, encontram-se descritos na Tabela 14. Na mesma tabela, resolvendo-se a Equação 15, obteve-se o valor de vazão previsto pelo modelo matemático linear decodificado correspondente aos respectivos valores de pressão e abertura, deste modo, determinando-se os resíduos existentes entre o valor médio experimental e o previsto pelo modelo, através da Equação 13.

Tabela 14 - Dados do ensaio complementar de validação da servo-válvula dosadora, estimativa, e resíduos obtidos com o modelo linear

Abertura (%)	Pressão (kPa)	Vazão Medida (mL.s ⁻¹)						Vazão estimada (mL.s ⁻¹)	Resíduo (mL.s ⁻¹)
		1	2	3	4	5	Média		
37	50	15,91	13,04	9,43	9,33	19,70	13,48	27,53	14,05
44	50	30,22	28,15	27,86	27,81	37,36	30,28	39,70	9,42
51	50	48,08	47,09	48,76	45,01	52,99	48,38	51,87	3,48
58	50	65,63	63,51	63,07	61,94	68,07	64,44	64,04	-0,41
65	50	80,17	77,46	77,25	75,97	80,65	78,30	76,20	-2,10
72	50	91,67	88,71	88,71	87,86	91,36	89,66	88,37	-1,29
79	50	100,36	98,92	97,86	97,52	100,00	98,93	100,54	1,61
86	50	107,42	106,18	104,17	104,56	106,18	105,70	112,71	7,01
93	50	114,11	111,79	110,00	110,00	112,24	111,63	124,87	13,25
37	75	15,96	11,34	17,18	22,38	15,82	16,54	34,06	17,53
44	75	41,60	33,29	36,38	38,04	37,52	37,37	48,90	11,54
51	75	62,08	56,12	57,17	59,27	60,98	59,12	63,75	4,62
58	75	82,58	77,90	77,25	79,25	80,17	79,43	78,59	-0,85
65	75	99,28	95,16	95,16	96,83	98,21	96,93	93,43	-3,50
72	75	114,11	110,89	109,56	110,89	111,34	111,36	108,27	-3,09
79	75	125,57	122,22	120,61	121,68	122,77	122,57	123,11	0,53
86	75	134,80	132,85	130,33	130,95	130,95	131,98	137,95	5,97
93	75	143,23	140,31	137,50	137,50	137,50	139,21	152,79	13,58
37	100	23,23	16,88	24,95	32,35	25,58	24,60	40,60	16,00
44	100	41,86	40,26	43,31	49,64	45,38	44,09	58,11	14,02
51	100	65,95	63,81	65,17	73,53	71,24	67,94	75,62	7,68
58	100	90,16	90,76	88,42	97,17	93,86	92,08	93,13	1,06
65	100	110,89	110,89	110,00	116,03	113,17	112,20	110,65	-1,55
72	100	127,91	126,73	126,73	131,58	128,50	128,29	128,16	-0,13
79	100	143,98	141,03	141,03	143,23	142,49	142,35	145,67	3,32
86	100	153,63	151,10	151,10	152,78	152,78	152,28	163,19	10,91
93	100	161,76	159,88	158,96	160,82	160,82	160,45	180,70	20,25
41,3	40	28,53	29,73	24,25	19,61	23,73	25,17	31,74	6,57
41,3	50	31,14	33,50	27,12	21,98	26,57	28,06	35,01	6,94
41,3	60	34,12	36,86	30,02	24,21	28,68	30,78	38,28	7,50
41,3	70	36,76	40,56	32,54	27,58	31,11	33,71	41,55	7,83

41,3	80	39,23	43,86	34,85	30,09	33,50	36,31	44,82	8,51
41,3	90	41,29	46,61	37,11	32,74	35,58	38,67	48,08	9,42
41,3	100	42,18	51,59	39,34	34,72	37,41	41,05	51,35	10,30
41,3	110	44,35	51,98	41,42	36,67	39,40	42,76	54,62	11,86
62,5	40	64,40	63,36	65,95	62,64	59,78	63,23	65,35	2,12
62,5	50	73,53	71,06	73,92	69,44	67,24	71,04	71,86	0,82
62,5	60	80,17	79,48	81,60	75,97	74,53	78,35	78,36	0,01
62,5	70	87,30	87,03	88,14	82,34	80,88	85,14	84,87	-0,27
62,5	80	95,16	93,54	94,83	88,71	86,21	91,69	91,38	-0,31
62,5	90	100,73	100,73	101,10	94,18	91,67	97,68	97,89	0,20
62,5	100	107,84	107,42	106,18	98,57	95,82	103,17	104,39	1,23
62,5	110	113,17	112,70	111,34	102,23	100,73	108,03	110,90	2,87
83,7	40	97,17	92,91	91,06	89,87	88,71	91,94	98,96	7,02
83,7	50	108,27	104,56	102,61	101,48	100,36	103,46	108,71	5,25
83,7	60	119,05	115,06	112,70	111,34	110,44	113,72	118,45	4,73
83,7	70	128,50	125,00	123,32	120,61	120,09	123,50	128,20	4,69
83,7	80	138,19	133,50	131,58	129,72	128,50	132,30	137,94	5,65
83,7	90	147,06	143,23	139,59	137,50	137,50	140,98	147,69	6,71
83,7	100	155,37	151,10	151,10	146,28	146,28	150,02	157,43	7,41
83,7	110	164,67	159,88	157,14	154,49	152,78	157,79	167,18	9,38

Com estes dados obteve-se o gráfico descrevendo a relação entre os valores experimentais e a previsão do modelo, obtida com a Equação 15, em três diferentes faixas de pressão, apresentada na Figura 50.

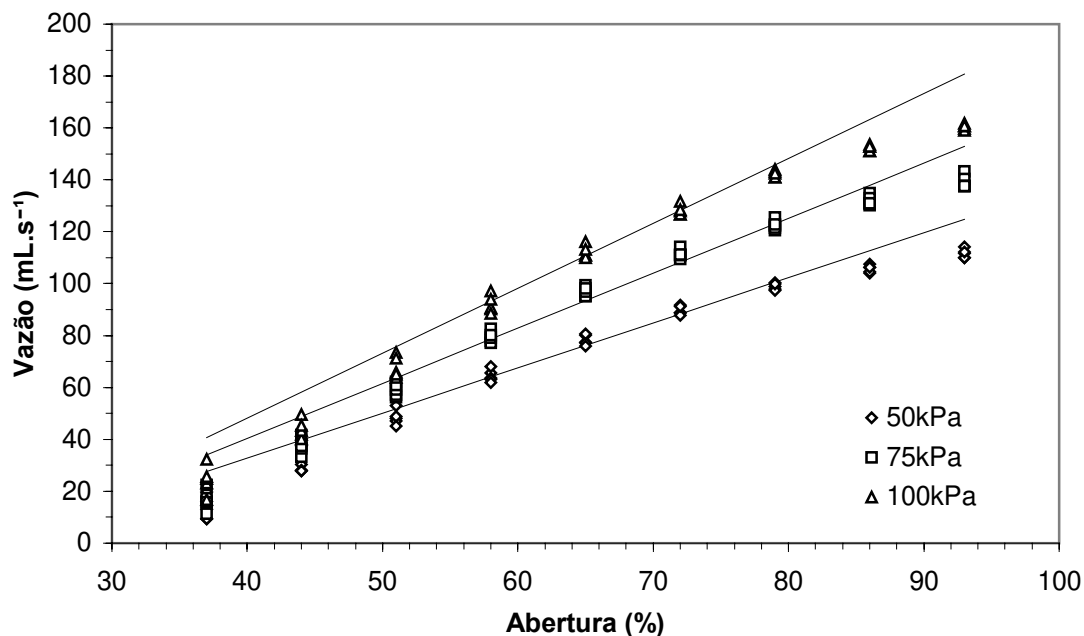


Figura 50 - Representação gráfica dos valores experimentais e os previstos pela reta do modelo matemático linear, para três diferentes pressões de trabalho, obtidos com os dados do ensaio de resíduos complementar

Na Figura 50 nota-se que o aumento da pressão faz com que as curvas distanciem-se uma das outras e também alterem a sua inclinação. Tal fenômeno explica-se pelo fato de que o aumento da pressão de trabalho eleva a vazão.

Com os dados dos resíduos da estimativa do modelo linear, calculados e apresentados na Tabela 14, construiu-se o gráfico de sua distribuição, para todas as faixas de abertura e pressão, apresentado na Figura 51.

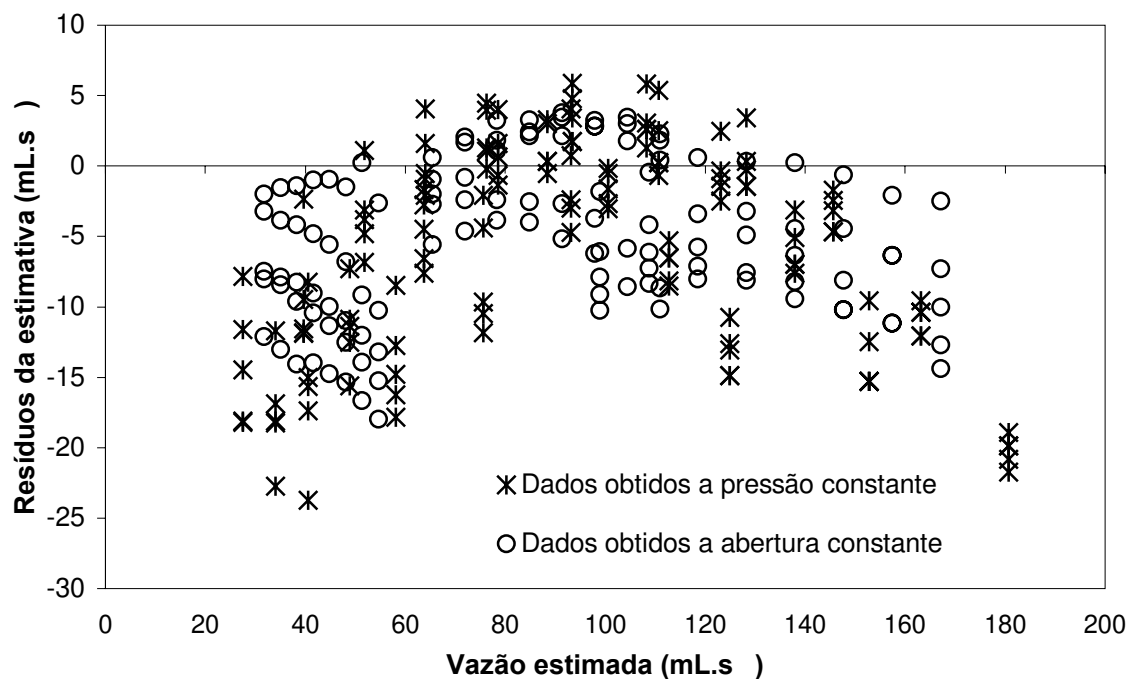


Figura 51 - Representação gráfica dos resíduos obtidos para o modelo linear no ensaio de resíduos complementar

Observando-se os gráficos descritos pela Figura 50 e Figura 51, novamente percebe-se a existência de uma tendência na distribuição dos resíduos.

Na faixa central o modelo tende a subestimar a vazão, nas demais o modelo tende a superestimar. Isto pode ser comprovado pela distribuição dos resíduos da estimativa, denotando um comportamento quadrático na estimativa da vazão em função da abertura e da pressão.

Tal tendência novamente aponta uma deficiência nas previsões feitas por este modelo. Em função disso, tornou-se necessário se elevar o grau do modelo com a finalidade de melhorar a qualidade da estimativa.

4.5.3. Levantamento do modelo matemático quadrático

Com a finalidade de melhorar a descrição do comportamento da válvula por meio de um modelo matemático quadrático, foi adotado o planejamento de ensaio descrito na Tabela 7.

Deste modo, acrescentando-se aos dados do ensaio utilizados para o levantamento do modelo linear, descritos na Tabela 11, os dados dos pontos adicionais provenientes do ensaio do planejamento em estrela, com cinco repetições, obtiveram-se os dados descritos na Tabela 15.

Tabela 15 - Dados obtidos no ensaio com o planejamento multifatorial 2^2 em estrela

Item	Abertura (nível)	Pressão (nível)	Abertura (%)	Pressão (kPa)	Vazão1 (mL.s ⁻¹)	Vazão 2 (mL.s ⁻¹)	Vazão 3 (mL.s ⁻¹)	Vazão 4 (mL.s ⁻¹)	Vazão 5 (mL.s ⁻¹)
1	-1	-1	41,3	50	34,12	30,59	28,29	31,04	30,29
2	1	-1	83,7	50	103,38	104,96	104,56	104,96	104,96
3	-1	1	41,3	100	46,45	51,31	44,28	46,93	47,09
4	1	1	83,7	100	153,63	153,63	152,78	153,63	152,78
5	0	0	62,5	75	95,16	93,54	91,06	95,16	91,06
6	0	0	62,5	75	94,50	89,87	93,86	95,49	89,58
7	0	0	62,5	75	94,83	95,16	96,15	94,50	94,83
8	-1,41421	0	32,5	75	17,21	13,58	13,46	15,19	11,11
9	0	1,414214	62,5	110,25	118,03	118,03	114,58	116,53	114,11
10	1,414214	0	92,5	75	139,59	138,89	138,19	141,03	138,19
11	0	-1,41421	62,5	39,75	67,07	66,91	67,40	66,27	65,01

Com estes dados obteve-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação para cada combinação de níveis do ensaio, os quais estão descritos na Tabela 16.

Tabela 16 - Resumo estatístico dos resultados do ensaio do planejamento em estrela

Item	Abertura (nível)	Pressão (nível)	Abertura (%)	Pressão (kPa)	Média y (mL.s ⁻¹)	s (mL.s ⁻¹)	CV(%)
1	-1	-1	41,3	50	30,87	2,10	6,81
2	1	-1	83,7	50	104,57	0,68	0,65
3	-1	1	41,3	100	47,21	2,55	5,40
4	1	1	83,7	100	153,29	0,47	0,30
5	0	0	62,5	75	93,19	2,06	2,21
6	0	0	62,5	75	92,66	2,74	2,96
7	0	0	62,5	75	95,09	0,64	0,67
8	-1,41421	0	32,5	75	14,11	2,26	16,03
9	0	1,414214	62,5	110,25	116,25	1,85	1,59
10	1,414214	0	92,5	75	139,18	1,19	0,85
11	0	-1,41421	62,5	39,75	66,53	0,95	1,42

Também foi possível determinar o erro experimental $s = 1,77\%$

Utilizando-se dos valores estabelecidos para os níveis de cada um dos dois fatores, constantes na Tabela 16, e acrescentando-se a coluna correspondente ao quadrado de cada um dos fatores mais a interação entre os dois fatores, obtém-se a matriz X .

$$X = \begin{bmatrix} 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & -1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & 1 & 1 & 1 & -1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & -\sqrt{2} & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & \sqrt{2} & 0 & 2 & 0 \\ 1 & \sqrt{2} & 0 & 2 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & -\sqrt{2} & 0 & 2 & 0 \end{bmatrix}$$

Resolvendo-se a Equação 9, obteve-se:

$$b = \begin{bmatrix} 93,648 \\ 44,581 \\ 16,923 \\ -8,5107 \\ -1,1365 \\ 8,0942 \end{bmatrix}$$

Portanto, o modelo matemático empírico codificado descrito pela Equação 7 passa a ser:

$$\hat{y}(x_1, x_2) = 93,65 + 44,58X_1 + 16,92X_2 - 8,511X_1^2 - 1,137X_2^2 + 8,094X_1X_2 \quad (16)$$

De forma análoga ao modelo linear, no ensaio de resíduos complementar, foram utilizados valores de abertura e pressão diferentes dos definidos para a obtenção do modelo matemático. Logo, também determinou-se um modelo matemático empírico decodificado.

Deste modo, substituindo na Equação 16 os termos:

$$X_1 = \left(\frac{A - \left(\frac{83,7 + 41,3}{2} \right)}{\frac{83,7 - 41,3}{2}} \right)$$

$$X_2 = \left(\frac{P - \left(\frac{100 + 50}{2} \right)}{\frac{100 - 50}{2}} \right)$$

Obtém-se o modelo decodificado:

$$\hat{y}(A, P) = -101,18 + 3,321A - 0,001958P - 0,01892A^2 - 0,001831P^2 + 0,01527AP \quad (17)$$

onde:

- $\hat{y}$ corresponde a vazão volumétrica prevista pelo modelo, em mL.s⁻¹;

- A corresponde ao percentual de abertura;
- P corresponde à pressão de trabalho em kPa.

Construindo-se a superfície de resposta descrita pela equação do modelo matemático codificado, conjuntamente com os pontos amostrados pelo ensaio, utilizando-se o *software STATGRAPHICS Plus*, tem-se o gráfico em curvas de nível, descrito na Figura 52.

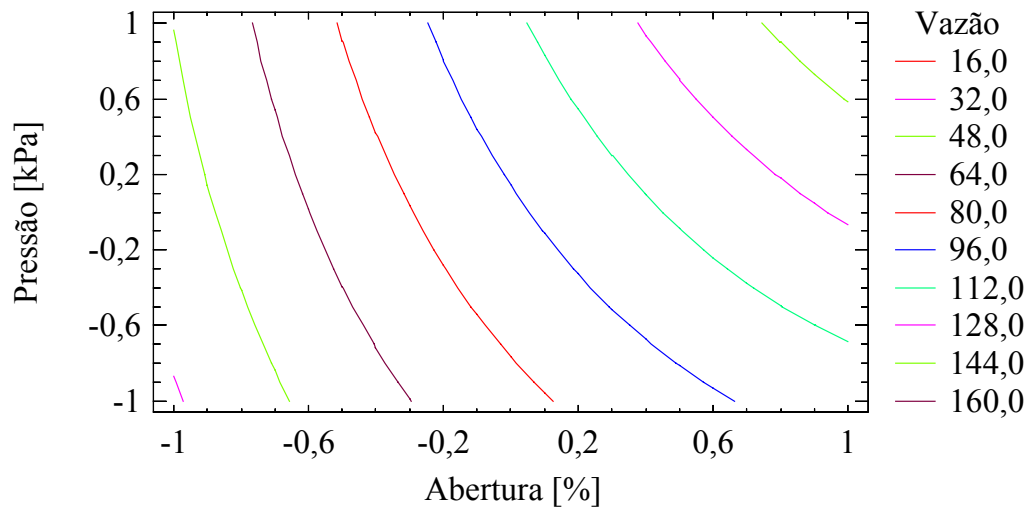


Figura 52 - Gráfico com a superfície de resposta do modelo matemático quadrático, descrito na forma de curvas de nível

4.5.4. Validação do modelo matemático quadrático

A validação do modelo matemático quadrático, a exemplo do modelo linear, foi realizada por meio do cálculo do coeficiente de determinação, da análise de variância e da análise da distribuição dos resíduos da estimativa.

4.5.4.1. Coeficiente de determinação

Resolvendo-se a Equação 10, obteve-se:

$$R^2 = 0,9981$$

Logo, pode-se afirmar que o modelo matemático adotado ajusta bem os valores utilizados para a sua obtenção.

4.5.4.2. Análise de variância

A avaliação estatística da regressão realizada para a obtenção do modelo multifatorial quadrático está descrita na Tabela 17.

Tabela 17 - Análise de variância do modelo quadrático

Fonte de Variação	Soma Quadrática	No de graus de liberdade	Média Quadrática	Razão F	Valor P
Regressão: X_1	79499,0	1	79499,0	23598,19	0,0000
Regressão: X_2	11456,9	1	11456,9	3400,83	0,0000
Regressão: X_1^2	2045,76	1	2045,76	607,26	0,0000
Regressão: X_2^2	36,5011	1	36,5011	10,83	0,0019
Regressão: $X_1.X_2$	1310,58	1	1310,58	389,03	0,0000
Falta de Ajuste	22,4958	3	7,49861	2,23	0,0978
Erro Puro	154,968	46	3,36886		
Total	94547,5	54			

$R^2 = 99,8123\%$
 R^2 (ajustado para os graus de liberdade) = 99,7931%
 Erro Padrão da Estimativa = 1,83545

Conforme observado na Tabela 17, todos os valores de P para os efeitos dos coeficientes X_1 , X_2 e $X_1.X_2$ são muito menores que 0,05, valor abaixo do qual o F calculado é superior ao F tabelado em um nível de confiança de 95%, logo os coeficientes são altamente significativos e nenhum deles deve ser desprezado. Também pode-se observar que a falta de ajuste do modelo não é muito significativa o que indica que o modelo tende a descrever bem os valores obtidos experimentalmente, no entanto, este valor ainda está muito próximo de 0,05 o que impede a afirmação de que o modelo realmente descreve bem estes valores, tornando ainda necessária a realização de ensaios complementares para avaliar melhor o modelo.

4.5.4.3. Distribuição dos resíduos

Utilizando-se dos dados dos ensaios para a determinação do modelo foi obtido, com o *software StatGraf*, o gráfico de distribuição de resíduos da Figura 53.

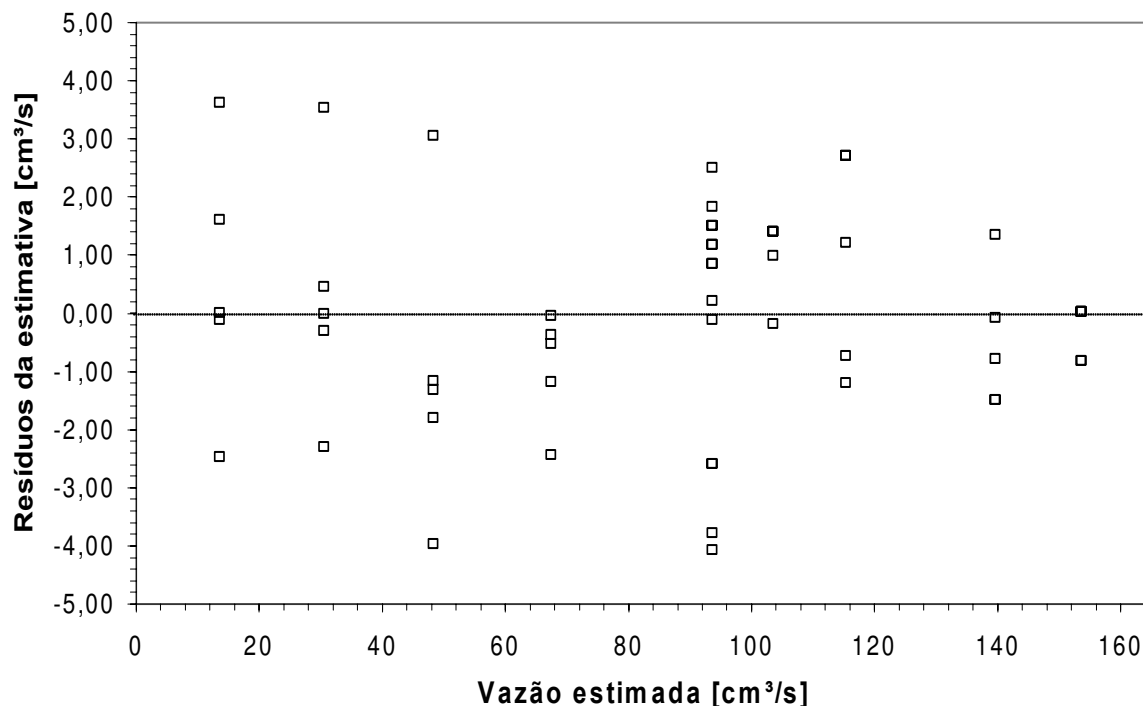


Figura 53 - Distribuição dos resíduos da estimativa obtidos com os valores utilizados para o levantamento do modelo matemático quadrático

Na Figura 53 nota-se uma sensível melhora em relação ao modelo linear, a distribuição dos resíduos apresenta-se de forma aleatória. Tal característica indica que o modelo descreve bem os resultados previstos por ele.

Os dados referentes aos valores obtidos nos ensaios complementares, específicos para a segunda análise de resíduos, encontram-se descritos na Tabela 18. Na mesma tabela, resolvendo-se a Equação 17, obteve-se o valor de vazão previsto pelo modelo matemático quadrático decodificado correspondente aos respectivos valores de pressão e abertura. Deste modo, determinando-se os resíduos existentes entre o valor médio experimental e o previsto pelo modelo, através da Equação 13.

Tabela 18 - Dados do ensaio de validação da servo-válvula dosadora, estimativa, e resíduos obtidos com o modelo quadrático

Abertura (%)	Pressão (kPa)	Vazão Medida (mL.s ⁻¹)						Vazão estimada (mL.s ⁻¹)	Resíduo (mL.s ⁻¹)
		1	2	3	4	5	Média		
37	50	15,91	13,04	9,43	9,33	19,70	13,48	19,39	5,90
44	50	30,22	28,15	27,86	27,81	37,36	30,28	37,25	6,97
51	50	48,08	47,09	48,76	45,01	52,99	48,38	53,27	4,89
58	50	65,63	63,51	63,07	61,94	68,07	64,44	67,43	2,99
65	50	80,17	77,46	77,25	75,97	80,65	78,30	79,74	1,44
72	50	91,67	88,71	88,71	87,86	91,36	89,66	90,19	0,53
79	50	100,36	98,92	97,86	97,52	100,00	98,93	98,79	-0,14
86	50	107,42	106,18	104,17	104,56	106,18	105,70	105,54	-0,16
93	50	114,11	111,79	110,00	110,00	112,24	111,63	110,43	-1,19
37	75	15,96	11,34	17,18	22,38	15,82	16,54	27,74	11,21
44	75	41,60	33,29	36,38	38,04	37,52	37,37	48,28	10,92
51	75	62,08	56,12	57,17	59,27	60,98	59,12	66,97	7,85
58	75	82,58	77,90	77,25	79,25	80,17	79,43	83,81	4,37
65	75	99,28	95,16	95,16	96,83	98,21	96,93	98,79	1,86
72	75	114,11	110,89	109,56	110,89	111,34	111,36	111,91	0,56
79	75	125,57	122,22	120,61	121,68	122,77	122,57	123,19	0,61
86	75	134,80	132,85	130,33	130,95	130,95	131,98	132,61	0,63
93	75	143,23	140,31	137,50	137,50	137,50	139,21	140,17	0,96
37	100	23,23	16,88	24,95	32,35	25,58	24,60	33,81	9,21
44	100	41,86	40,26	43,31	49,64	45,38	44,09	57,02	12,93
51	100	65,95	63,81	65,17	73,53	71,24	67,94	78,38	10,45
58	100	90,16	90,76	88,42	97,17	93,86	92,08	97,89	5,81
65	100	110,89	110,89	110,00	116,03	113,17	112,20	115,54	3,35
72	100	127,91	126,73	126,73	131,58	128,50	128,29	131,34	3,05
79	100	143,98	141,03	141,03	143,23	142,49	142,35	145,29	2,94
86	100	153,63	151,10	151,10	152,78	152,78	152,28	157,38	5,10
93	100	161,76	159,88	158,96	160,82	160,82	160,45	167,62	7,17
41,3	40	28,53	29,73	24,25	19,61	23,73	25,17	25,94	0,77
41,3	50	31,14	33,50	27,12	21,98	26,57	28,06	30,58	2,52
41,3	60	34,12	36,86	30,02	24,21	28,68	30,78	34,86	4,08
41,3	70	36,76	40,56	32,54	27,58	31,11	33,71	38,76	5,05

41,3	80	39,23	43,86	34,85	30,09	33,50	36,31	42,30	6,00
41,3	90	41,29	46,61	37,11	32,74	35,58	38,67	45,48	6,81
41,3	100	42,18	51,59	39,34	34,72	37,41	41,05	48,29	7,24
41,3	110	44,35	51,98	41,42	36,67	39,40	42,76	50,73	7,97
62,5	40	64,40	63,36	65,95	62,64	59,78	63,23	67,68	4,45
62,5	50	73,53	71,06	73,92	69,44	67,24	71,04	75,56	4,52
62,5	60	80,17	79,48	81,60	75,97	74,53	78,35	83,07	4,72
62,5	70	87,30	87,03	88,14	82,34	80,88	85,14	90,21	5,08
62,5	80	95,16	93,54	94,83	88,71	86,21	91,69	96,99	5,30
62,5	90	100,73	100,73	101,10	94,18	91,67	97,68	103,40	5,72
62,5	100	107,84	107,42	106,18	98,57	95,82	103,17	109,45	6,29
62,5	110	113,17	112,70	111,34	102,23	100,73	108,03	115,13	7,10
83,7	40	97,17	92,91	91,06	89,87	88,71	91,94	92,41	0,47
83,7	50	108,27	104,56	102,61	101,48	100,36	103,46	103,53	0,07
83,7	60	119,05	115,06	112,70	111,34	110,44	113,72	114,28	0,56
83,7	70	128,50	125,00	123,32	120,61	120,09	123,50	124,66	1,16
83,7	80	138,19	133,50	131,58	129,72	128,50	132,30	134,68	2,38
83,7	90	147,06	143,23	139,59	137,50	137,50	140,98	144,33	3,35
83,7	100	155,37	151,10	151,10	146,28	146,28	150,02	153,61	3,59
83,7	110	164,67	159,88	157,14	154,49	152,78	157,79	162,53	4,74

Com estes dados, construiu-se um gráfico descrevendo a relação entre os valores experimentais e a previsão do modelo, obtido com a Equação 17, em três diferentes faixas de pressão, apresentado na Figura 54.

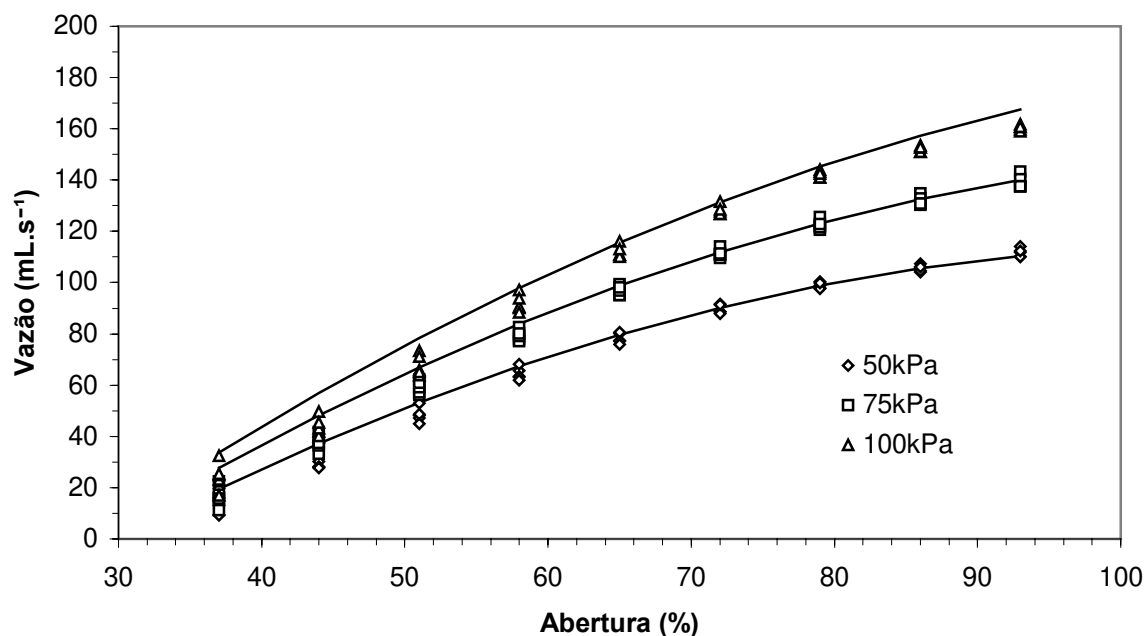


Figura 54 - Representação gráfica dos valores experimentais e os previstos pela reta do modelo matemático quadrático, para três diferentes pressões de trabalho, obtidos no ensaio complementar

Na Figura 54, a exemplo do modelo linear, nota-se que o aumento da pressão faz com que as curvas distanciem-se umas das outras e também alterem as suas inclinações. Tal fenômeno explica-se pelo fato de que o aumento da pressão de trabalho eleva a vazão.

Utilizando-se dos dados da Tabela 18, construiu-se um gráfico com os resíduos para todas as faixas de abertura e pressão ensaiadas, em relação aos seus respectivos valores previstos pelo modelo matemático quadrático, o qual é apresentado na Figura 55.

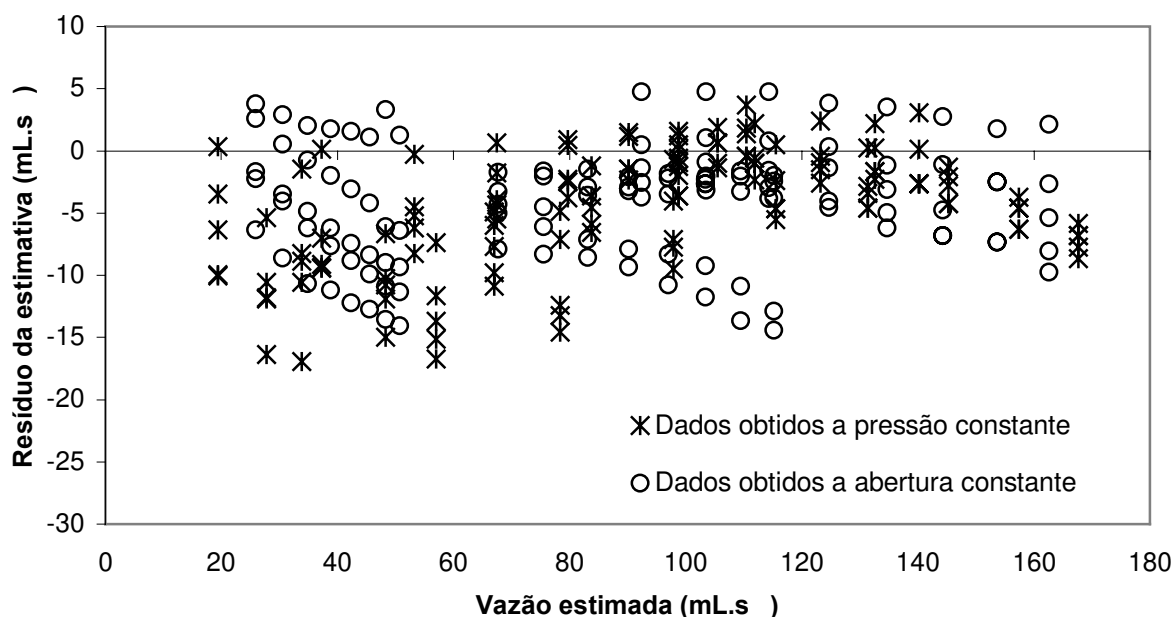


Figura 55 - Representação gráfica dos resíduos obtidos com o modelo quadrático, obtidos no ensaio complementar

Observando-se o gráfico apresentado pela Figura 54 nota-se que este ajusta-se melhor aos valores experimentais em relação ao modelo linear.

No gráfico de resíduos, apresentado na Figura 55, percebe-se que foi minimizada a existência de tendência na curva.

Não existe mais a tendência ao modelo superestimar a vazão na faixa central e a subestimar nas laterais. Neste modelo os valores mostraram-se dispersos de forma mais aleatória. No entanto, pode-se observar que o modelo apresenta a tendência a superestimar todos os valores de vazão. Logo, torna-se interessante efetuar um ajuste fino de modo a melhorar essa característica.

4.5.4.4. Ajuste fino do modelo quadrático

O ajuste fino foi feito subtraindo-se a vazão de 3mL.s^{-1} da constante da equação do modelo quadrático que passou de $-101,18\text{mL.s}^{-1}$ para $-104,18\text{mL.s}^{-1}$, o que corresponde 2,96% do valor original. Deste modo o modelo matemático quadrático passou a ser descrito por:

$$\hat{y}(x_1, x_2) = -104,18 + 3,321X_1 - 0,001958X_2 - 0,01892X_1^2 - 0,001831X_2^2 + 0,01527X_1X_2 \quad (18)$$

Reconstruindo-se o gráfico que descreve a relação entre os valores experimentais e a previsão do modelo, em três diferentes faixas de pressão, obteve-se a Figura 56.

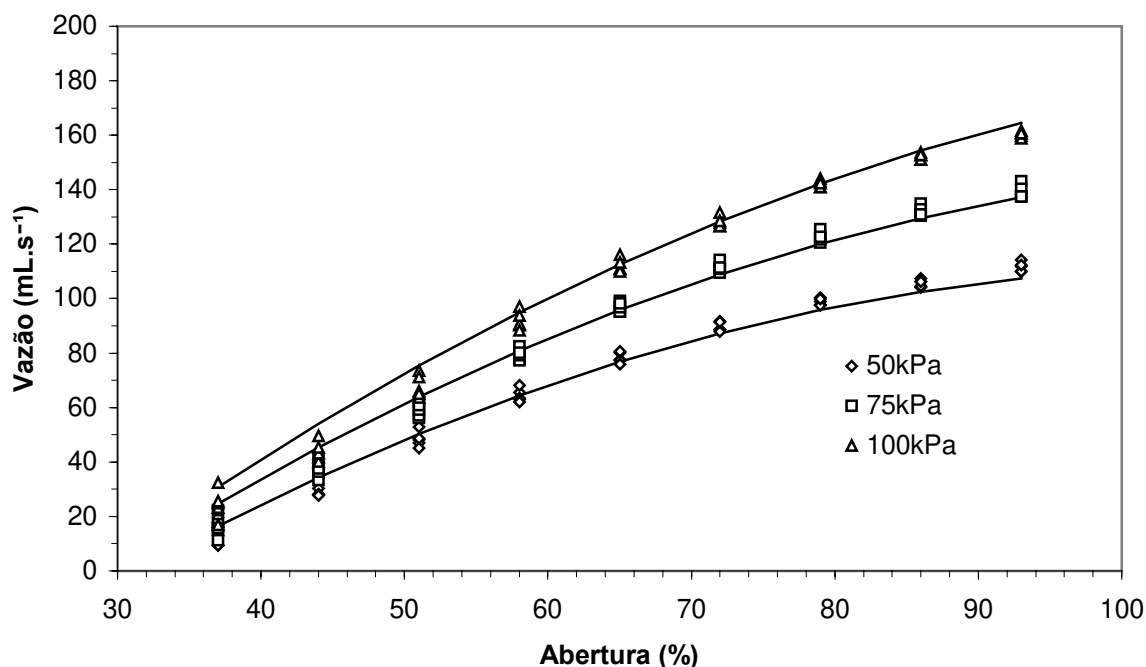


Figura 56 - Representação gráfica dos valores experimentais e os previstos pela curva do modelo matemático quadrático ajustado, para três diferentes pressões de trabalho

O gráfico da Figura 56 demonstra uma melhora no ajuste da metade inferior dos valores de vazão obtido pela válvula, mantendo-se um bom ajuste na metade superior. Também pode ser observado que a curva do modelo para a pressão de trabalho de 75kPa foi a que melhor ajustou os dados experimentais. O que demonstra ser esta a pressão de trabalho mais indicada para se operar o sistema.

Com o novo modelo também se obtém uma nova distribuição de resíduos, a qual é apresentada pelo gráfico da Figura 57.

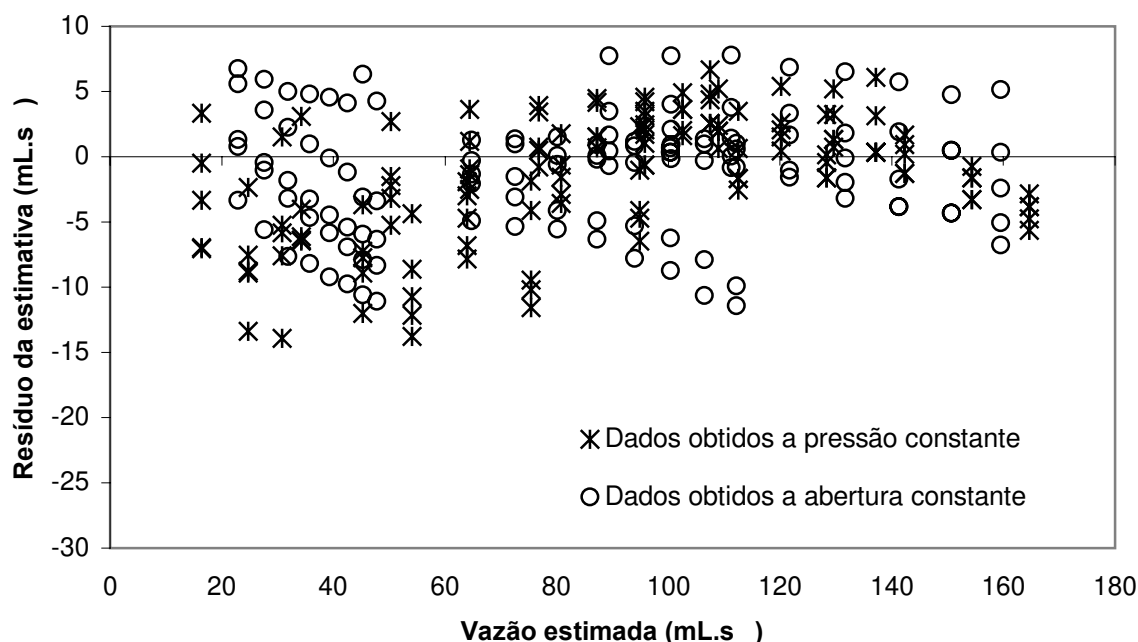


Figura 57 - Representação gráfica dos resíduos obtidos com o modelo quadrático ajustado

Observa-se uma sensível melhora na distribuição dos resíduos, eliminando-se a característica que o modelo apresentava de superestimar os valores de vazão.

O procedimento de ajuste fino se equivale ao procedimento de ajuste de calibração descrito no item 4.1. Este procedimento servirá para melhorar a qualidade do modelo matemático, ajustando o seu termo constante de modo a absorver a influencia decorrente de variações em fatores não descritos pelo modelo matemático utilizado neste trabalho. Tal procedimento mostra-se muito importante uma vez que o modelo irá operar e malha aberta.

4.6. Estimativa de custos para a fabricação do protótipo da válvula

O custo foi estimado para fabricação na região de Ribeirão Preto, no mês de maio de 2004, sendo que trata-se apenas das despesas com fabricação, matéria prima e mão-de-obra. Não estão inclusos custos financeiros, fiscais e administrativos. Os dados relativos a este levantamento estão descritos na Tabela 19.

Tabela 19 - Levantamento de custo da válvula dosadora desenvolvida

Descrição	Mão de Obra	Matéria Prima	Material	Produto manufaturado
Servo-motor	-	-	-	R\$ 56,00
Chapa de suporte do motor	R\$ 5,00	R\$ 0,46	Inox	
Bucha de fixação da chapa suporte	R\$ 3,00	R\$ 0,10	ABNT 1045	
Acoplamento do fuso com o motor	R\$ 2,00	R\$ 0,08	ABNT 1045	
Fuso	R\$ 3,00	R\$ 0,04	ABNT 1045	
Base do cone com o fuso	R\$ 5,00	R\$ 0,04	ABNT 1045	
Mola	-	-	Aço Mola	R\$ 0,10
Cone	R\$ 2,00	R\$ 0,19	Inox	
Suporte do cone e fuso	R\$ 3,00	R\$ 0,31	ABNT 1045	
Anel de Vedação	-	-	Inox	R\$ 0,10
Corpo da Válvula	R\$ 6,00	R\$ 3,00	Inox	
Parafusos	-	-	Aço Oxidado	R\$ 0,20
Orings	-	-	Elastômero	R\$ 1,00
Montagem	R\$ 5,00	-	-	-
<i>Custos Parciais</i>	R\$ 34,00	R\$ 4,22		R\$ 57,40
<i>Custo Total</i>				R\$ 95,62

O custo de fabricação do protótipo da válvula proporcional fabricada foi de R\$ 96,00 (US\$ 40,00 à taxa de US\$ 1,00 = R\$ 2,40) por unidade, sendo este valor passível de redução em uma produção em larga escala.

5. CONCLUSÕES

Em relação ao presente trabalho pode-se concluir que:

A construção e avaliação do protótipo da servo-válvula instalada em uma bancada de testes representativa de um circuito simplificado do sistema de formulação e aplicação localizada de insumos líquidos, na forma de soluções, permitem concluir que o sistema idealizado é viável.

As válvulas comerciais com acionamento por solenóide, avaliadas neste trabalho, não se mostraram adequadas no controle da vazão de fertilizante líquido.

A válvula dosadora desenvolvida neste trabalho apresentou comportamento quanto à histerese, repetitividade e linearidade, em relação à vazão, que possibilitou seu uso no sistema de aplicação idealizado, especialmente na faixa de abertura de 25% a 100%, nas pressões estudadas.

O projeto da válvula permite alterações dimensionais que possibilitam sua operação em faixas de vazão distintas da estudada neste trabalho.

O projeto do conjunto da válvula e do sistema de acionamento permitiu a obtenção de um dispositivo para controle da vazão de baixo custo.

A metodologia para avaliação do comportamento da válvula dosadora foi adequada. O sistema de medição para levantamento dos dados experimentais mostrou-se eficiente, permitindo a medição e o registro automatizado dos resultados.

O modelo matemático linear obtido para descrever o comportamento da válvula dosadora mostrou-se deficiente na estimativa da vazão, já que a válvula apresentou comportamento não linear da vazão em função da abertura e da pressão de operação.

O modelo matemático quadrático descreveu com propriedade o comportamento da válvula no que diz respeito à estimativa da vazão em função da abertura e da pressão de operação.

A idealização do sistema de formulação, dosagem e aplicação localizada de fertilizantes líquidos a taxas variáveis, o projeto e desenvolvimento de uma válvula controladora de vazão, bem como, seu sistema de acionamento, estabeleceram a base para a construção de novos equipamentos de aplicação ou até mesmo, a adaptação de equipamentos de aplicação já existentes.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A experiência obtida com a realização deste trabalho permite sugerir os seguintes temas para trabalhos futuros:

- Desenvolver e avaliar um protótipo do sistema de aplicação operando com três concentrados distintos.
- Realizar testes para analisar a dependência da vazão controlada em função da viscosidade da suspensão ou da solução. Obter o modelo matemático que contemple esta dependência.
- Aperfeiçoar a válvula e seu sistema de acionamento para que possa operar adequadamente em toda sua faixa de abertura.
- Desenvolver um sistema eletrônico que a partir de informações de um sistema GPS e de mapas de aplicação seja capaz de controlar a formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes líquidos a taxas variáveis.

7. APÊNDICE

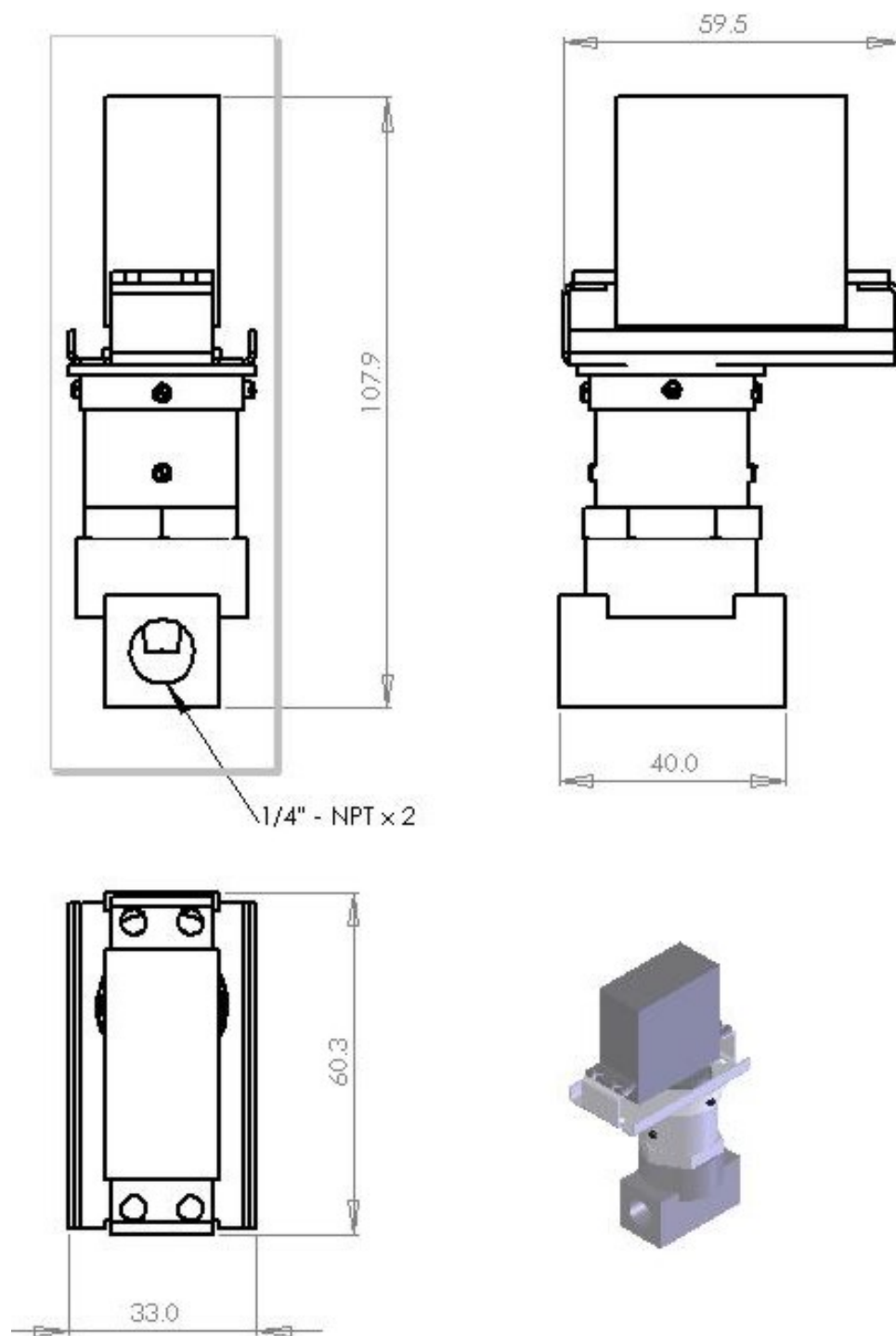


Figura 58 - Desenho de conjunto da válvula dosadora desenvolvida.

8. ANEXO

Tabela 20 - Dosagens máximas e mínimas de NPK, interdependente da produção esperada

Cultura	População (ha ⁻¹)	Espaçamento	Fase	Min/Max	N	P (P ₂ O ₅)	K (K ₂ O)
					(kg.ha ⁻¹)		
Algodão	45.500 a 143.000 plantas	0,70 a 1,10m	plantio	Min	10	20	20
				Max	10	120	80
			cobertura	Min	15	-	20
				Max	70	-	40
Arroz de sequeiro	1.000.000 a 1.400.000 sementes	40 a 50cm	plantio	Min	10	0	0
				Max	10	80	60
			cobertura	Min	20	-	-
				Max	60	-	-
Arroz Irrigado	3.000.000 a 3.300.000 sementes	30cm	plantio	Min	10	0	0
				Max	30	80	100
			cobertura	Min	40	-	-
				Max	100	-	-
Aveia, centeio	2.350.000 a 3.530.000 sementes	17cm	plantio	Min	20	20	10
				Max	30	90	60
			cobertura	Min	0	-	-
				Max	40	-	-
Batata	-	0,75 a 0,80m	plantio	Min	40	100	100
				Max	80	300	250
			cobertura	Min	40	-	-
				Max	80	-	-
Café	2.680 a 20.000 covas	-	plantio	Min	15 g.m ⁻¹	0 g.m ⁻¹	-
				Max	60 g.m ⁻¹	30 g.m ⁻¹	-
			produção	Min	50	0	20
				Max	450	100	300

Cana-de-açúcar	120.000 a 180.000 gemas	1,0 a 1,5m	plantio	Min	30	40	0
				Max	30	180	200
			cobertura (cana-soca)	Min	60	0	30
				Max	120	30	150
Cevada	2.940.000 a 3.530.000 sementes	17cm	plantio	Min	20	20	10
				Max	30	90	60
			cobertura	Min	0	-	-
				Max	30	-	-
Feijão (águas e seca)	150.000 a 200.000 plantas	0,50 a 0,60m	plantio	Min	0	0	0
				Max	10	90	60
			cobertura	Min	20	-	-
				Max	90	-	-
Feijão (irrigado)	150.000 a 200.000 plantas	0,50 a 0,60	plantio	Min	0	0	0
				Max	20	90	100
			cobertura	Min	20	-	-
				Max	90	-	-
Gergelim	400.000 a 500.000 sementes	0,40 a 0,60m	plantio	Min	10	20	20
				Max	10	80	60
			cobertura	Min	20	-	-
				Max	20	-	-
Girassol	50.000 a 55.000 plantas	0,50 a 0,90m	plantio	Min	10	20	20
				Max	10	70	60
			cobertura	Min	40	-	-
				Max	40	-	-
Grão-de-bico	300.000 a 400.000 sementes	0,50m	plantio	Min	-	0	0
				Max	-	80	60
			cobertura	Min	0 (inoc.)	-	-
				Max	50	-	-
Milho (grãos)	55.500 a 62.500	0,80 a 0,90m	plantio	Min	10	20	0
				Max	30	90	50

	plantas		cobertura	Min	40	10	0
				Max	140	110	110
Milho (safrinha)	33.000 a 44.000 plantas	0,90m	plantio	Min	30	0	0
				Max	30	60	50
			cobertura	Min	0	-	-
				Max	30	-	-
Soja	320.000 a 400.000 sementes	0,50m	semeadura	Min	-	20	0
				Max	-	90	80
Sorgo	150.000 a 200.000 plantas	50 a 70cm	plantio	Min	10	20	0
				Max	30	90	50
			cobertura	Min	10	-	0
				Max	90	-	40
Trigo e tritcale (irrigado)	3.500.000 a 4.700.000 sementes	17cm	plantio	Min	20	20	10
				Max	30	90	90
			cobertura	Min	20	-	-
				Max	90	-	-
Trigo e tritcale (sequeiro)	3.500.000 a 4.700.000 sementes	17cm	plantio	Min	20	20	10
				Max	30	90	60
			cobertura	Min	0	-	-
				Max	40	-	-

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR10584: Células de carga (transdutores de força) - Determinação das características de desempenho.** Rio de Janeiro, 1989.

AGCHEM EUROPE B.V. **Liquid Manure - Self Propelled.**
<<http://www.agchemeurope.com/main.asp>>, 16/02/2003.

ARAUJO FILHO, Haroldo Alves de. Estágio Atual das Indústrias que Produzem Fertilizantes Fluídos - Fertilbrás S.A. Adubos e Fertilizantes. In: Simpósio Brasileiro sobre Fertilizantes Fluídos, 343, 1993, Piracicaba. **Fertilizantes Fluídos...** Piracicaba: Potafos, p. 89-98, 1994.

BALASTREIRE, Luiz A. Agricultura de Precisão: Uma Tecnologia Para o Próximo Milênio. **NOTESALQ.** Piracicaba SP, v.viii, p.9 - 9, 1999. internet: <http://www.pulverizador.com.br/images/agricultura/agricultura_precisao%20art%20cpt.pdf>, 14/01/2003.

BALASTREIRE, L. A., AMARAL, J. R., Leal, J.C.G., BAIO, F. H. R. Mapeamento da Produtividade e de Atributos de Solos e de Plantas: Mapeamento da Produtividade de uma Cultura de Café. In: BALASTREIRE, Luiz Antonio (org.). **Avanços na Agricultura de Precisão no Brasil no Período 1999-2001**, Piracicaba, 2002. internet: <<http://www.ciagri.usp.br/~leia/ressucafe.htm>>, 14/01/2003.

BAUTISTA, E. U.; KOIKE, M.; SUMINISTRADO, D. C. **Mechanical Deep Placement of Nitrogen in Wetland Rice.** Journal of Agricultural Engineering Research, v.4, n.78, 2001, p. 333-346, on line in: <<http://www.idealibrary.com>>, 29/06/2002.

BICHARA, José Mateus; RAMOS, Valdemir Ferreira; AZEVEDO, Paulo Brito M. de Azevedo; CASTRO, Mário Luiz M. Mattos de. Projetos e Processos Utilizados na Indústria de

Fertilizantes Fluidos. In: Simpósio Brasileiro sobre Fertilizantes Fluídos, 343, 1993, Piracicaba. **Fertilizantes Fluídos...** Piracicaba: Potafos, p. 85-88, 1994.

BITTECOURT, Valdomiro Corrêa de; BEAUCLAIR, Edgard Gomes Ferreira de. Fertilizantes Fluídos. In: XX Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, 425, 1992, Piracicaba. **Anais dos Simpósios...** Campinas: Fundação Cargil, p. 255-274, 1992.

BOARETO, Antonio Enedi; CRUZ, António de Pádua; LUZ, Pedro Henrique de Cerqueira. **Adubo Líquido**: produção e uso no Brasil. São Paulo: Fundação Cargill, 1991.

BRAGACHINI, Mario; MARTINI, Axel von; MARTELLOTO, Eduardo; MÉNDEZ, Andrés. **Grupo INTA Manfredi/COOVAECO Informe técnico del 12º Viaje de Capacitación Técnica a los EEUU de Norteamérica**. setembro de 2001. <<http://www.agriculturadeprecision.org/viajcapa/EEUU2001.htm>>, 16/02/2003.

CERQUEIRA LUZ, P.H. **Aplicadores de fertilizantes fluídos**. Araras: IAA/PLANALSUCAR, 1985.

DAVIS, Glenn; CASADY, William; MASSEY, Ray. Precision Agriculture: An Introduction. **Water Quality**. University of Missouri-System, 1998, P.8. internet: <<http://www.fse.missouri.edu/mpac/pubs/wq0450.pdf>>, 14/01/2003.

DEPARTMENT OF BIOLOGICAL AND AGRICULTURAL ENGINEERING, UNIVERSITY OF GEORGIA. **Review of Variable Rate Application Equipment for Precision Farming**. <<http://www.engr.uga.edu/research/groups/precisionfarming/descrip.html#cont>> , 16/02/2003.

DICKEY JOHN. **Agricultural Products**. <http://www.dickey-john.com/Ag_Products/Ag_Products.htm>, 16/02/2003.

FIXEN, Paul E. - Fluid Fertilizers in an Evolving Agriculture. In: Simpósio Brasileiro sobre Fertilizantes Fluídos, 343, 1993, Piracicaba. **Fertilizantes Fluídos...** Piracicaba: Potafos, p. 1-30, 1994.

FUNDAÇÃO ABC. **Agricultura de Precisão**. <http://www.fundacaoabc.com.br/agric_prec/agriculturaprecisao1.htm>, 14/01/2003.

GOERING, C. E. How much and where. **Agricultural Engineering**, St. Joseph: ASAE, v.73, n.4, p 13-15, Jul., 1992.

GOERING, C. E. Recycling a concept. **Agricultural Engineering**, St. Joseph: ASAE, v. 74, n. 6, p. 25, Nov., 1993.

JORGE, Lúcio André de Castro; TORRE NETO, André. Agricultura de Precisão. In: Workshop: O Agronegócio na Sociedade de Informação, 2002, Brasília, **Anais...** internet: <<http://www.agrosoft.com.br/ag2002/workshop/ver.php?page=133>>, 14/01/2003.

KEE TECHNOLOGIES. **Powering Farm Production – Precision Agriculture**. <http://www.kee.com.au/pa_seeding.htm>, 13/06/2005.

KENNEDY, Michael. **The Global Positioning System and GIS: An Introduction**. 2ª Edição. Jackson - MI (USA): TJ International Ltd, 2002.

LEDEBUHR, Mark. Peristaltic Metering Technology for Variable Rate Control. In: ASAE Annual International Meeting, 2000, Milwaukee. **Paper No. 001161**, St. Joseph: ASAE, 2000.

LOCH Carlos, CORDINI Jucilei. **Topografia Contemporânea: Planimetria**, 2ª Edição Revisada. Florianópolis - SC: Editora da UFSC, 2000.

MACINTYRE, Archibald Joseph. **Bombas e Instalações de Bombeamento**. 2ª Edição Revista. Rio de Janeiro - RJ: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 1997.

MALAVOLTA, Eurípedes. Situação da Adubação Fluída no Brasil. In: Simpósio Brasileiro sobre Fertilizantes Fluídos, 343, 1993, Piracicaba. **Fertilizantes Fluídos...** Piracicaba: Potafos, p. 31-54, 1994.

MANZATTO, Celso Vainer; BHERING, Silvio Barge, SIMÕES, Margareth. **Agricultura de Precisão: Propostas e Ações da Embrapa Solos.** <<http://www.cnps.embrapa.br/search/pesqs/proj01/proj01.html>>, 14/01/2003.

MCGUIRE, J. T. **Pumps for chemical processing.** New York: Marcel Dekker, Inc., 1990.

MACHADO, Pedro L. O. A. **Um Desafio da Embrapa Solos: Agricultura de Precisão para a Recomendação de Adubação da Soja sob Plantio Direto.** <<http://www.cnps.embrapa.br/search/pesqs/proj04/proj04.html>>, 14/01/2003.

MIDWEST TECHNOLOGY. **Product Line.** <<http://www.mid-tech.com/products.htm>>, 16/02/2003.

NETO, Benício de Barros; SCARMINIO, Ieda Spacino; BRUNS, Roy Edward. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na indústria.** 2ª Edição. Campinas - SP: Editora da UNICAMP, 2002.

NETO, Evandro de Figueiredo, CARDOSO, Robson dos Santos. **Instrumentação - Elementos Finais de Controle.** Vitória - ES: SENAI (Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial) e CTIIAF (Centro Técnico de Instrumentação Industrial Arivaldo Fontes), 1999.

OLIVA, Rodrigo Antonio Godoy; CAPPELLI, Nelson Luis; UMEZU, Claudio Kiyoshi. Máquina para aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis - Adaptação de um modelo comercial convencional. In XXX CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 2001 Foz do Iguaçu. **Anais...** Jaboticabal - SP: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola - SBEA, 2001.

OLIVA, Rodrigo Antonio Godoy. **Desenvolvimento e avaliação de um sistema hidráulico/mecânico para aplicação de fertilizantes sólidos, no sulco, a taxas variáveis.** 84p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2001.

OSEKI, Yasuzo. Agricultura de Precisão. In: **XV Semana de Ciência Agrárias de Lavras**, 1998, Lavras. internet: < <http://www.pulverizador.com.br/images/agricultura>>, 14/01/2003.

PAGNANO, Natasha Biagi; MAGALHÃES, Paulo Sérgio Grasiano. Sistema de monitoramento da colheita de cana-de-açúcar para elaboração de mapas de rendimento. In: **Circuito Brasil de Agricultura de Precisão.** v.1, 2000. internet: <http://www.agriculturadeprecisao.com.br/artigos/artigo_4.html>, 14/01/2003.

PERTICARRARI, Guilherme; BRAUMBEEK, Oscar Antonio. Agitação hidromecânica para herbicidas e adubos fluidos. In: Seminário de Tecnologia Agronômica, 3., 1986, Piracicaba. **Anais...** São Paulo: Copersucar, p. 480-486, 1986.

PICCIN, Carlos Roberto. Estágio Atual das Indústrias que Produzem Fertilizantes Fluídos - Adubo Fluido na Cultura Cafeeira. In: Simpósio Brasileiro sobre Fertilizantes Fluídos, 343, 1993, Piracicaba. **Fertilizantes Fluídos...** Piracicaba: Potafos, p. 171-177, 1994.

PROGRESSIVE FARM PRODUCTS INC. **Fertilizer Equipment.** <<http://www.progressivefarm.com/html/fertilizer.html>> , 16/02/2003.

RAIJ, Bernardo van; QUAGGIO José Antonio. **Boletim Técnico 100**, Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 1996.

RAVEN INDUSTRIES. **Application Control Systems.** <<http://ravenind.com/RavenPrecision/Index.cfm?Section=ProductsServices&Page=Product.cfm&ID=1>>, 16/02/2003.

SCIVITTARO, Walkyria Bueno; BOARETO, Antonio Eneidi; MURAOKA, Takashi. Dinâmica do Fósforo de Fertilizantes Fluidos e Sólidos no Sistema Solo-Planta. In: Simpósio Brasileiro sobre Fertilizantes Fluídos, 343, 1993, Piracicaba. **Fertilizantes Fluídos...** Piracicaba: Potafos, p. 331-343, 1994.

SPRAYING STSTEMS Co. **Produtos de Sistemas Móveis: Catálogo 49A-P**. Wheaton, 2004.

THE BRITISH VALVE MANUFACTURERS' ASSOCIATION. **Valves for the Control of Fluids**. Manchester: C. Nicholls & Company Ltd., 1964.

TRIVELIN, Paulo César O.; CABEZAZ, Waldo A. R. Lara; BOARETO, Antonio Eneidi. Dinâmica do Nitrogênio de Fertilizantes Fluidos no Sistema Solo-Planta. In: Simpósio Brasileiro sobre Fertilizantes Fluídos, 343, 1993, Piracicaba. **Fertilizantes Fluídos...** Piracicaba: Potafos, p. 315-330, 1994.

TSCHIEDEL, Mauro; FERREIRA, Mauro Fernando. Introdução à Agricultura de Precisão: Conceitos e Vantagens. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.1, p. 159-163, 2002.

ULSON, José Alfredo Covolan. **Desenvolvimento de um sistema de controle inteligente para a aplicação de fertilizantes líquidos em taxas variáveis**. 142p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Botucatu, 2002.

UMEZU, Claudio Kiyoshi; CAPPELLI, Nelson Luis. Desenvolvimento de um sistema para formulação, dosagem e aplicação de fertilizantes sólidos a taxas variáveis. In: BALASTREIRE, Luiz Antonio. (Org.). **Avanços na agricultura de precisão na Brasil no período de 1999-2001**. Piracicaba, 2002, p. 223-229. CD-ROM.

YETTER FARM PRODUCTS. **Yetter Farm Equipment Catalog.**
<<http://www.yetterco.com/catalog.html>>, 16/02/2003.