DESENVOLVIMENTO E COMPROVAÇÃO DE UM MODELO MATEMATICO PARA
SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM DISTRIBUIDOR DE FERTILIZANTES
DE TUBO OSCILANTE

NELSON FRANCISCO DA SILVA
Engenheiro Agrônomo

Orientador   Prof. Tit. LUIZ ANTONIO BALASTREIRE

Dissertação apresentada à Escola
Superior de Agricultura "Luiz de
Queiróz", da Universidade de São
Paulo, para obtenção do título de
Mestre em Agronomia, Área de Con-
centração: Máquinas Agrícolas.

P I R A C I C A B A
Estado de São Paulo - Brasil
Outubro - 1991

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/USP

Silva, Nelson Francisco da

S586d   Desenvolvimento e comprovação de um modelo matemático
para simulação de desempenho de um distribuidor de ferti-
lizantes de tubo oscilante. Piracicaba, 1991.
76p. ilustr.

Diss.(Mestre) - ESALQ
Bibliografia.

1. Adubo - Distribuição - Equipamento 2. Equipamento
agrícola - Desempenho - Modelo matemático 3. Equipamento
agrícola - Desempenho - Simulação 4. Modelo matemático I.
Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 631.33

112

DESENVOLVIMENTO E COMPROVAÇÃO DE UM MODELO MATEMATICO PARA
SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM DISTRIBUIDOR DE FERTILIZANTES
DE TUBO OSCILANTE

NELSON FRANCISCO DA SILVA

Aprovada em: 22.11.1991

Comissão Julgadora:

Prof.Dr. Luiz Antônio Balastreire

ESALQ/USP

Prof.Dr. Carlos Antônio Gamero

FCA/UNESP

Prof.Dr. Paulo S. Graziano Magalhães

FEAGRI/UNICAMP

Prof. Dr. Luiz Antônio Balastreire
Orientador

À minha esposa Marcela,
 aos meus pais Dr. Nelson
 e Annita e a meu irmão
 Luiz Cláudio,

AGRADECIMENTOS

À Deus pela fé e esperança concedidos em todos os momentos de minha vida.

Ao Prof. Tit. Luiz Antônio Balastreire pela orientação, apoio e amizade recebidos na realização deste trabalho.

Ao amigo Moacyr Machado Cardoso Jr. pela valiosa colaboração no desenvolvimento da parte teórica e experimental deste trabalho.

Aos amigos de turma do Curso de Pós Graduação em Máquinas Agrícolas pela amizade e apoio concedidos.

À Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz, aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Rural pela amizade compartilhada.

Ao Centro Nacional de Engenharia Agrícola e aos funcionários pelo apoio dispensado na realização deste curso de Mestrado.

E todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para o êxito deste trabalho,

Agradeço.

INDICE

	Página
Lista de Abreviaturas e Símbolos	vii
Lista de Figuras.....	ix
Lista de Tabelas.....	x
Resumo	xi
Summary	xii
1. Introdução	1
2. Revisão de Literatura	5
3. Material e Métodos	15
3.1. Material	15
3.2. Metodologia	18
3.2.1. Desenvolvimento do Modelo Matemático...	18
3.2.2. Simulação	28
3.2.3. Análise do Fertilizante.....	29
3.2.4. Ensaio Experimental	31
3.2.5. Metodologia de Análise dos Resultados .	32
4. Resultados e Discussão	35
4.1. Análise Granulométrica	35
4.2. Ensaio Experimental	37
4.2.1. Largura da Faixa Distribuída	41
4.2.2. Análise Estatística	44
5. Conclusões	53
6. Referências Bibliográficas	55
7. Bibliografia Consultada	58

Apêndice 1	59
Apêndice 2	69

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

- $\varnothing$ = ângulo descrito pela partícula até ser lançada, rad
 α = amplitude de movimento do tubo, rad
 β = posição do tubo, rad
 Ωt = posição do volante, rad
 θ = ângulo de lançamento da partícula, rad
 Δ = ângulo da trajetória da partícula em relação ao eixo x
 ω = velocidade angular do disco ou tubo, rad/s
 ωt = posição do tubo do distribuidor, rad
 Ω = velocidade angular da tomada de potência, rad/s
 U = velocidade radial da partícula, m/s
 V = velocidade resultante de saída da partícula, m/s
 g = aceleração gravitacional, m/s²
 t = tempo de queda da partícula no solo, s
 y = altura do tubo em relação ao solo, m
 Z = distância de lançamento da partícula, m
 δ = raio médio da partícula, m
 A = constante de resistência do ar
 γ_p = peso específico do adubo, kg/m³
 γ_a = peso específico do ar, kg/m³
 R_t = raio efetivo do tubo, m
 a = posição inicial da partícula, m
 R_v = raio do volante, m
 d = distância do centro do volante ao ponto de inserção do tubo no distribuidor, m

s = espaço descrito pelo tubo, m

μ = coeficiente de atrito entre a partícula e a parede do disco ou do tubo

R = raio do disco, m

C_d = coeficiente aerodinâmico da partícula

X = distância percorrida pela partícula, m

X_1 = fator de correção da distância, m

LISTA DE FIGURAS

Fig.		Pag.
1	Ângulo descrito pela partícula no disco.....	60
2	Ângulos e parâmetros da partícula no tubo.....	61
3	Ilustração da transferência de movimento do volante da máquina para o tubo.....	62
4	Variação da posição do tubo em relação à posição do volante.....	63
5	Variação da velocidade em relação à posição do volante.....	64
6	Posição dos recipientes coletores no campo.....	65
7	Ângulo Δ e demais ângulos descritos pela partícula no tubo.....	66
8	Fator de correção da distância para $\beta + \theta > \alpha$	67
9	Fator de correção da distância para $\beta + \theta < \alpha$	67
10	Contador eletrônico de partículas.....	68
11	Curva de Distribuição do Fertilizante: Experimental e Simulado	43
12	Curva de Distribuição do Fertilizante: Simulado e Limites de Intervalos de Confiança com nível de significância de 5 % dos dados experimentais.....	47
13	Curva de Distribuição do Fertilizante: Simulado e Limites de Intervalos de Confiança com nível de significância de 1 % dos dados experimentais.....	48
14	Desvio Absoluto e Desvio Médio	51

LISTA DE TABELAS

Tabela	Pág.
1 Resultados da Análise Granulométrica do Fertilizante.....	35
2 Resultados de Massa de Partículas entre os Ensaios Experimental e Simulado.....	38
3 Resultados de Frequência de Partículas entre os Ensaios Experimental e Simulado	39
4 Resultados de Número de Partículas entre os Ensaios Experimental e Simulado	40
5 Limites Superior e Inferior de Intervalo de Confiança (I.C.) dos valores experimentais ao nível de significância de 5 % e valores simulados	45
6 Limites Superior e Inferior de Intervalo de Confiança (I.C.) dos valores experimentais ao nível de significância de 1 % e valores simulados	46
7 Desvios Absolutos dos Valores Experimentais em relação aos valores simulados	50

DESENVOLVIMENTO E COMPROVAÇÃO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DE DESEMPENHO DE UM DISTRIBUIDOR DE FERTILIZANTES DE TUBO OSCILANTE

Autor: NELSON FRANCISCO DA SILVA

Orientador: Prof. Tit. LUIZ ANTÔNIO BALASTREIRE

RESUMO

Com o objetivo de simular o desempenho de um distribuidor de fertilizante de tubo oscilante, desenvolveu-se um modelo matemático para prever a curva de distribuição transversal da máquina. O modelo matemático foi desenvolvido a partir da teoria estudada para distribuidores centrífugos e por envolver uma quantidade elevada de cálculos, foi elaborado um programa em linguagem Basic aplicado à microcomputadores padrão IBM/PC. A comprovação deste modelo foi obtida através da comparação dos dados conseguidos através de ensaio experimental utilizando fertilizante granulado 04-14-08.

A análise dos resultados compreendeu um estudo da largura da faixa distribuída e a configuração da faixa quando comparada com a faixa experimental.

Os resultados obtidos mostraram ser possível representar apenas metade da faixa, ou seja apenas a faixa produzida pela metade do ciclo completo do tubo, uma vez que se considerou a faixa simétrica em relação ao centro da máquina. As larguras da faixa obtidas pelo ensaio simulado e pelo experimental foram 10,0 m e 13,2 m respectivamente. No entanto a diferença encontrada entre as faixas distribuídas apresentou um acréscimo de apenas 6,6 % da massa total distribuída pela máquina.

Chegou-se à conclusão que o modelo foi satisfatório apesar das hipóteses simplificadoras adotadas.

DEVELOPMENT AND CONFIRMATION OF A MATHEMATICAL MODEL TO
SIMULATE THE PERFORMANCE OF AN OSCILLATORY FERTILIZER
SPREADER

Author: NELSON FRANCISCO DA SILVA

Adviser: Prof. Tit. LUIZ ANTÔNIO BALASTREIRE

SUMMARY

In order to simulate the performance of an oscillatory fertilizer spreader, a mathematical model, based on the theory of centrifugal spreaders, was developed to estimate the width of the transversal swath. The model simulates the discharge of a great number of particles and to analyse their trajectories an IBM/PC microcomputer was used. The results of the simulation were compared with the experimental data obtained for a 04-14-08 granular fertilizer.

To analyse the results, the maximum width and the shape of the swath were compared with the experimental swath.

Experimental data showed that the swath is symmetric and therefore, it was possible to study one half of it. The model simulated a 10.0 m swath of application while the experimental reached a width of 13.2 m. An increase of 6.6 % of the simulated total particle mass was observed when compared with the experimental one.

Finally, it was concluded the model is adequate to simulate an oscillatory spreader considering the adopted simplifying hypothesis.

1. INTRODUÇÃO

Com o aumento desordenado na taxa de natalidade, o crescimento da população mundial passou a ser um fator de estudo incessante a ponto de alguns pesquisadores chegarem à conclusão que tal crescimento esteja se tornando irreversível. A FAO (1984), Organização das Nações Unidas para a Agricultura e Alimentação, estima que entre os anos de 1980 e 2000, 90% do crescimento demográfico total se verificará no mundo sub-desenvolvido, demandando, por conseguinte uma maior produção de alimentos. Por outro lado as regiões em que se situam os países em desenvolvimento, tropicais e sub-tropicais, com solos caracteristicamente ácidos e pobres quimicamente, necessitam para uma produtividade aceitável grandes quantidades de corretivos onerando o custo de produção. Atualmente, as grandes propriedades exigem uma alta capacidade operacional nesses trabalhos, daí o surgimento cada vez maior de máquinas para esses tipos de operações.

Embora a bibliografia sobre máquinas agrícolas, em geral, seja bastante volumosa, muito pouco se tem pesquisado sobre os distribuidores de fertilizantes. Sabe-se que, atualmente quase que na totalidade das culturas anuais brasileiras, a adubação de plantio é realizada conjuntamente com a operação de semeadura. No entanto, em certas condições essa operação é impraticável, ou não aconselhável, por falta de condições de tráfego na área ou por aspectos econômicos. Ao se considerar os países que empregam uma melhor tecnologia na área agropecuária, nota-se que a utilização de adubadoras à lanço já se efetua em grande escala. Com o aparecimento de novas máquinas surgem as preocupações quanto ao seus desempenhos.

No Brasil os ensaios de desempenhos têm sido realizados em centros credenciados representando um dos instrumentos mais importantes no julgamento dos atributos das máquinas, tendo além disso como principais objetivos:

1. Levantar informações e dados técnicos visando obter características verdadeiras e livres de interferência comercial;

2. Atuar diretamente como elemento de garantia mínima de qualidade;

3. Fornecer ao usuário dados que permitam a adoção de critérios racionais para a seleção das máquinas,

através da interpretação das informações dos relatórios de ensaios;

4. Prover os fabricantes de dados que permitam aprimorar seus produtos, uma vez que nem todos têm condições de manter um laboratório completo de ensaios.

No entanto, os ensaios de distribuidores de fertilizantes caracterizam-se por trabalhos que demandam grande quantidade de mão de obra e principalmente características climáticas adequadas com respeito à velocidade do vento, umidade relativa do ar e temperatura ambiente. Justamente para incentivar a inovação de novas máquinas surgiram os estudos de modelos de distribuição que passaram a ser a meta de muitos projetos de pesquisa, combatendo os antigos métodos por tentativas e ajustes dos erros, historicamente utilizados. Além disso, o surgimento da informática e consequente aplicação destes modelos por computadores, trouxe uma esperança muito grande no intuito de reduzir custos e obter protótipos mais adequados às pesquisas futuras. GRIFFIS (1983) afirmou que pouco desenvolvimento ao longo dos anos ocorreram nesses modelos.

Baseando-se nesses aspectos, este trabalho visa elaborar um modelo matemático e testar sua viabilidade para simular a distribuição de fertilizantes granulados em campo a partir de uma dosagem pré-estabelecida, para um distribuidor de tubo oscilante, também conhecido como distribuidor pendular. A comprovação do modelo será

realizada através de ensaios realizados nas condições de operação da máquina em campo de ensaio.

2. REVISÃO DE LITERATURA

POPP (1985), ressaltou o uso da operação manual durante várias décadas, mas com o aumento de áreas de plantio e a utilização de fertilizantes com maior frequência, essa prática tornou-se inviável. Os fertilizantes, no entanto, podem ser aplicados manualmente, ficando seu uso restrito à pequenas áreas e tendo o inconveniente da dificuldade de dosagem correta. Com o surgimento dos sistemas de distribuição por gravidade e à lança, esses problemas passaram a ser minimizados, no entanto o sistema por gravidade, tem como inconveniente a pequena capacidade operacional. Os sistemas de distribuição à lança envolvem máquinas com discos rotativos ou tubos oscilantes para lançamento de partículas. Desses sistemas, o principal problema que ocorre é a irregularidade da distribuição de partículas no perfil transversal.

Quanto ao aspecto econômico uma desuniformidade na distribuição diminuirá o retorno do investimento assim como afetará a uniformidade da cultura. Outro aspecto a se destacar é quanto a velocidade angular que afeta a segregação permitindo que partículas maiores

sejam lançadas mais distantes do que partículas de menor diâmetro. SILVA (1982), verificou que partículas menores que 2,0 mm sofrem maior segregação em relação às maiores (4,0 a 6,0 mm).

Os distribuidores centrífugos de fertilizantes tem sido citados na literatura como de grande capacidade operacional, baixo custo, simplicidade de operação e tamanho reduzido quando relacionado com a largura da faixa de deposição conforme CUNNINGHAM (1963) e DAVIS & RICE (1973).

CUNNINGHAM (1963), afirma ainda que a segregação de partículas afeta negativamente a uniformidade da aplicação. Tais máquinas, quando mal reguladas, ou com projeto deficiente, podem causar uma deposição não uniforme.

REED & WACKER (1970), relatam que a uniformidade de aplicação de um fertilizante à uma determinada razão de lançamento é de primordial importância. Além de provocar irregularidades no crescimento, varia também a época de maturidade da cultura trazendo sérios problemas para a colheita. Descrevem os principais fatores que afetam o padrão de distribuição, que são: variabilidade do tamanho de partículas, ajustes nas lâminas do rotor, ponto de queda no rotor e taxa de aplicação.

BERNACKI et alii (1972), relatam que os distribuidores centrífugos são equipamentos de baixa

relação de taxa de aplicação por largura de trabalho, simples e consequentemente baratos, com alta capacidade e segurança operacional. Constataram que trabalhando à taxas de aplicações maiores, os distribuidores apresentaram melhores resultados em termos de uniformidade de aplicação do que quando trabalhavam com taxas de aplicações menores. Trabalhando com simulação de partículas, mostraram a dedução da equação que permitia determinar o ângulo com que as partículas eram lançadas para fora do disco, assim:

$$\theta = \tan^{-1}(\omega * \frac{R}{U})$$

onde : θ = ângulo de lançamento da partícula, rad

ω = velocidade angular do disco, rad/s

R = raio do disco, m

U = velocidade radial da partícula, rad/s

Da mesma forma, deduziram a equação da velocidade radial da partícula como sendo:

$$U = \omega \cdot R \cdot \sqrt{(\mu^2 + 1)} - \mu$$

onde : U = velocidade radial da partícula, rad/s

μ = coeficiente de atrito entre a partícula e a parede do disco.

A velocidade resultante do lançamento da partícula pelo disco é dada por:

$$v = \sqrt{\omega^2 \cdot R^2 + U^2}$$

onde: v = velocidade resultante de saída da partícula a partir do disco, m/s

DAVIS & RICE (1974), afirmam que a introdução da simulação através de computadores, viabilizou o estudo de sistemas complexos, tornando possível o estudo de modelos matemáticos que regem o comportamento das máquinas. Estes autores utilizando a linguagem CSMP (Continuous Systems Modeling Program), simularam a faixa de deposição de um distribuidor centrífugo de adubo e concluíram que estes podem ser simulados com um grau razoável de aproximação, sendo para isto necessário a determinação das

características aerodinâmicas das partículas de adubo.

BRINSFIELD & HUMMEL (1975), simulando um distribuidor centrífugo concluíram que o coeficiente de atrito diminui a velocidade resultante e aumenta o ângulo de saída. Citam ainda que quanto menor for a área frontal da partícula maior será a velocidade.

GALILI & SHTEINGAUZ (1982), desenvolveram um modelo matemático para simular o deslocamento de uma partícula e concluíram que o mesmo é de grande valia para o projeto da máquina. Estes autores citam ainda que o coeficiente aerodinâmico das partículas de adubo assume o valor de 0,44 para partículas esféricas.

PITT et alii (1982), desenvolveram equações aproximadas para descrever a trajetória de uma partícula no ar e para a distribuição no solo. Estes autores concluíram que a variabilidade do tamanho e de massa das partículas, não afetam a forma da distribuição, embora o tamanho médio das partículas seja importante. A comparação dos resultados experimentais e simulados estiveram muito próximos. Concluíram que a equação que previa a distância percorrida pela partícula ao ser lançada pelo disco e levando-se em conta a resistência do ar, podia ser definida da seguinte forma:

$$Z = A \ln \left(v \frac{t}{A} + 1 \right)$$

onde: Z = distância de lançamento da partícula pelo disco, m

Nesse caso, o tempo de queda da partícula é calculado pela equação:

$$t = \sqrt{2 \frac{Y}{g}}$$

sendo: t = tempo de queda da partícula, s

y = altura do disco em relação ao solo, m

g = aceleração da gravidade, 9,81 m/s²

E a resistência do ar era calculada por:

$$A = \frac{8 \cdot \gamma_p \cdot \delta}{3 \cdot \gamma_a \cdot C_d}$$

sendo : γ_p : peso específico do adubo, kgf/m³

γ_a : peso específico do ar, kgf/m³

δ : raio médio da partícula, m

C_d : coeficiente aerodinâmico da partícula

GRIFFIS et alii (1983), também trabalhando com simulação da deposição obtida por distribuidores centrífugos, concluíram que é um método eficaz para prever a largura da faixa produzida e a distribuição. No entanto os autores afirmam que a impossibilidade de prever a interação das partículas, introduz um erro aleatório na simulação. Em seu trabalho utilizaram a equação derivada por RANEY (1946) em um artigo não publicado que previa o ângulo que a partícula descrevia ao cair em um disco rotativo até ser lançada por ele como sendo:

$$\phi = \cosh^{-1} \left(\frac{R}{a} \right)$$

sendo: ϕ = ângulo descrito pela partícula, rad

R = raio efetivo do disco, m

a = posição inicial da partícula, m

A relação entre R , a , e ϕ é ilustrada na figura 1, no apêndice 1. A equação desprezou as componentes de atrito entre partícula e disco.

Citaram ainda, PATTERNSON e REECE (1962) que acharam a componente da velocidade radial até a zona periférica do disco como sendo:

$$U = \omega * R * \sqrt{(\mu^2 + 1)} - \mu$$

sendo: U = velocidade radial da partícula, rad/s

μ = coeficiente de atrito entre a partícula e a parede do disco

Além disso, mostraram que a velocidade das partículas ao deixarem o disco podia ser definida como:

$$v = \sqrt{\omega^2 R^2 + U^2}$$

onde: v = velocidade resultante de saída da
partícula, m/s

e ainda

$$\theta = \tan^{-1} \left(\omega * \frac{R}{U} \right)$$

onde: w = velocidade angular do disco, rad/s

R = raio do disco, m

U = velocidade radial da partícula, m/s

Estas equações se comparam com as descritas por BERNACKI et alii (1972).

PARISH (1986) visando minimizar o problema da irregularidade da distribuição de partículas em distribuidores rotativos, propôs uma recomendação que consistia em aplicar a metade da taxa calculada e cobrir o dobro da área. Concluiu esses dados após estudo através de uma comparação por computador onde obteve 25% de coeficiente de variação para a aplicação recomendada e 44% para a aplicação normal. Esse ponto de vista, no entanto, confronta-se com o de BERNACKI et alii (1972) que afirmaram

que melhores resultados em termos de uniformidade ocorrem em aplicações de taxas maiores de fertilizantes.

SILVA et alli (1990) iniciaram um trabalho com distribuidores de fertilizantes de tubo oscilante e concluíram que era possível simular a faixa de distribuição de fertilizantes pela máquina com uma boa aproximação.

Até a realização deste trabalho, não havia se identificado nenhum trabalho realizado para a modelos de distribuidores de tubo oscilante.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Material

Para a realização da parte experimental utilizou-se um distribuidor de tubo oscilante cujas características mais importantes para o estudo em questão seguem abaixo:

Marca: Vicon

Modelo: PS 600

Categoria de Engate: I e II

Tipo de Engate: Montado

Capacidade: 600 kgf

Comprimento do tubo oscilante: 0,5 m

Defletor frontal: ausente

Altura de Trabalho: 0,75 m

Amplitude Total do Movimento do Tubo: 0,90574 rad

Velocidade Angular de Trabalho: 540 rpm

Taxa de Aplicação: 400 kgf/ha

Para o acionamento da máquina utilizou-se um trator de rodas cujas características mais importantes para este trabalho são relacionadas a seguir:

Marca: Yanmar

Modelo: 1050 D

Tipo de Tração: 4x2 auxiliar

Potência do Motor: 24,0 kW a 2570 rpm

Categoria de Engate do Sistema Hidráulico: II

Velocidade de Operação: 5,5 km/h à rotação nominal de
540 rpm na TDP

Marcha Utilizada: 1a. H

O ensaio foi realizado no campo de demonstração de máquinas agrícolas do Departamento de Engenharia Rural da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz (ESALQ/USP) em Piracicaba, São Paulo, Brasil.

As características do campo de demonstração bem como as condições atmosféricas no momento do ensaio são descritas a seguir:

Superfície do terreno : uniforme

Cobertura vegetal : grama batatais (Paspalum spp.)

Declividade : 0 %

Velocidade do vento : 0 a 0,5 m/s

Temperatura : 31 °C

Umidade relativa do ar : 60%

Outros materiais utilizados seguem abaixo:

- 600 kg de fertilizante com formulação NPK 4-14-8.
- Conjunto de peneiras granulométricas marca Solotest de dimensões: 1,00; 1,19; 2,00; 2,38; 3,36; 4,00; 4,76 mm.
- Agitador mecânico marca Chime Test.
- Balança eletrônica Mettler PE 3600
- Contador eletrônico de partículas
- Recipientes coletores de dimensões 0,6 x 0,4 x 0,15 m
- Tacômetro de leitura direta
- anemômetro marca Jules Richard
- microcomputador de 16 bits padrão IBM/PC

3.2. Metodologia

3.2.1. Desenvolvimento do Modelo Matemático

O movimento alternativo de um tubo oscilante faz com que, uma partícula depositada em seu interior, deslize por sua parede durante um ciclo sendo projetada para a parede oposta na inversão de ciclo continuando a deslizar, e assim sucessivamente até deixar o tubo com uma determinada velocidade e ângulo de projeção.

Baseando-se nessa teoria utilizou-se a equação que descreve o ângulo descrito pelas partículas até serem projetadas para fora de um disco rotativo, que no caso se aplicou para o modelo de um distribuidor de tubo oscilante.

$$\phi = \cosh^{-1} \left(\frac{Rt}{a} \right)$$

sendo: ϕ = ângulo descrito pela partícula no
interior do tubo, rad

Rt = raio efetivo do tubo, m

a = posição inicial da partícula, m

A figura 2, no apêndice 1, ilustra o ângulo descrito por essa equação.

Quando se trata de um disco rotativo o ponto de queda inicial da partícula (a) é constante, pois o fluxo de descarga do fertilizante sobre o disco é sempre no mesmo ponto. No entanto, para o caso deste distribuidor, as posições das partículas no interior do tubo são variáveis. Isso fez com que fosse necessário simular as diversas posições das partículas ao longo do comprimento total do tubo.

Um outro parâmetro estudado foi a simulação das diversas posições do tubo dentro de sua amplitude angular. Para que fosse possível este fato, deduziu-se a equação a seguir, a partir da transferência de movimento do volante do distribuidor, acionado pela tomada de potência do trator, para o tubo oscilante.

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{R_v}{d} \cos(\Omega t) \right)$$

onde: β = posição do tubo, rad

Ωt = posição do volante do distribuidor, rad

R_v = raio do volante do distribuidor, m

d = distância do centro do volante ao ponto de
inserção do tubo no distribuidor, m

Um esquema ilustrativo do sistema de transmissão de movimento do volante do distribuidor para o tubo oscilante pode ser visto na figura 3, no apêndice 1.

A figura 4, no apêndice 1, ilustra a variação de β (ângulo da posição do tubo) em relação ao movimento do volante.

Devido à natureza do movimento harmônico, a velocidade angular do tubo não é constante, pois é zero quando se encontra nos extremos do ciclo (inversão do sentido) e é máxima quando passa pelo centro de sua amplitude angular. Para a obtenção da velocidade angular de cada posição do tubo partiu-se da equação fundamental do espaço em movimentos circulares, a saber:

$$s = \beta * Rt$$

onde: s = espaço descrito pelo tubo, m

β = posição do tubo, rad

Rt = raio do tubo, m

Derivando-se a equação do espaço obtem-se a velocidade linear do tubo (V),

$$v = \frac{ds}{dt} = v = Rt * \frac{d\beta}{dt}$$

Como a equação fundamental da velocidade do movimento angular é:

$$v = Rt * \omega$$

Por analogia tem-se que:

$$\omega = \frac{d\beta}{dt}$$

Dessa forma tem-se que a velocidade angular do tubo é definida por:

$$\omega = \frac{\left(-\frac{Rv}{d} * \Omega * \sin \Omega t\right)}{1 + \left(\frac{Rv}{d} * \cos \Omega t\right)^2}$$

onde : ω = velocidade angular do tubo, rad/s

Ω = velocidade angular da tomada de potência,
rad/s

Ωt = posição do volante do distribuidor, rad

A figura 5, no apêndice 1, mostra a variação da velocidade em função da posição do tubo.

A equação a seguir permitiu determinar o ângulo com que as partículas foram lançadas para fora do tubo.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\omega * \frac{Rt}{U} \right)$$

onde : θ = ângulo de lançamento da partícula, rad

ω = velocidade angular do tubo, rad/s

Rt = raio do tubo, m

U = velocidade radial da partícula, rad/s

A equação da velocidade radial da partícula é definida como sendo:

$$U = \omega \cdot R t \cdot \sqrt{(\mu^2 + 1)} - \mu$$

sendo: U = velocidade radial da partícula, rad/s

μ = coeficiente de atrito entre a partícula e a parede do tubo

E a velocidade resultante do lançamento da partícula do disco:

$$V = \sqrt{\omega^2 \cdot R t^2 + U^2}$$

onde: V = velocidade resultante de saída da partícula do tubo, m/s

A equação que calcula a distância que a partícula percorre ao ser lançada do tubo é descrita a seguir:

$$Z - A \ln \left(V + \frac{t}{A} + 1 \right)$$

onde: Z = distância de lançamento da partícula pelo tubo, m

A = constante de resistência do ar

V = velocidade de lançamento da partícula, m/s

t = tempo de queda da partícula até atingir o solo, s

Nesse caso, admitiu-se uma resistência do ar desprezível no sentido vertical de queda da partícula. Dessa forma, o tempo de queda da partícula até atingir o solo foi calculado pela equação:

$$t = \sqrt{2 * \frac{y}{g}}$$

sendo: t = tempo de queda da partícula, s

y = altura do tubo em relação ao solo, m

g = aceleração da gravidade, 9.81 m/s²

E a constante de resistência do ar no sentido horizontal do lançamento da partícula foi calculada por:

$$A = \frac{8 \cdot \gamma_p \cdot \delta}{3 \cdot \gamma_a \cdot C_d}$$

sendo : γ_p : peso específico do adubo , kgf/m³

γ_a : peso específico do ar , kgf/m³

δ : raio médio da partícula , m

C_d : coeficiente aerodinâmico da partícula

Imaginando-se um sistema composto por 2 eixos denominados eixo y, o eixo de deslocamento do conjunto trator-distribuidor e eixo x, o eixo de disposição dos recipientes coletores, conforme figura 6, no apêndice 1, calculou-se o ângulo da trajetória da partícula em relação ao eixo x que foi definido da seguinte forma :

$$\Delta = \frac{\pi}{2} - \theta + \frac{\alpha}{2} - \beta - \phi$$

onde: Δ = ângulo da trajetória da partícula em relação ao eixo x, rad

θ = ângulo de lançamento da partícula, rad

α = amplitude de movimento do tubo, rad

β = posição do tubo, rad

ϕ = ângulo descrito pela partícula até ser lançada para fora do tubo, rad

A figura 7, no apêndice 1, ilustra os parâmetros estudados.

Finalmente tem-se que a distância em relação ao eixo x percorrida pela partícula é calculada por:

$$X - (Z \cdot \cos \Delta) \pm X_1$$

onde: X = distância percorrida pela partícula, m

X₁ = fator de correção, m

O parâmetro X₁ tem por objetivo corrigir o ponto de origem da partícula, já que considerou-se sempre a distância a partir do centro da máquina. Dessa forma, tem-se duas possibilidades :

1. Se a soma dos ângulos β e $\varnothing$ for superior a $\pi/2$ tem-se que acrescer a distância correspondente ao ângulo $(\beta + \varnothing - \pi/2)$ Daí tem-se:

$$X_1 - R t \cdot \sin(\beta + \phi - \frac{\pi}{2})$$

2. Se a soma dos ângulos β e ϕ for inferior a $\kappa/2$ tem-se que decrescer a distância correspondente ao ângulo ($\kappa/2 - (\beta + \phi)$). Daí tem-se :

$$X_1 = R t \sin\left(\frac{\kappa}{2} - (\beta + \phi)\right)$$

As figuras 8 e 9, no apêndice 1, ilustram os parâmetros acima citados.

Com as equações descritas anteriormente foi construído o modelo, com auxílio de uma programa aplicativo, dotado de recursos iterativos, para microcomputador IBM - PC .

O modelo está baseado em algumas hipóteses, que são descritas abaixo :

1. Todas as partículas deslizam pelas paredes do tubo
2. Não há interação entre as partículas;
3. As partículas são esféricas;
4. Ausência total de vento;
5. Adotou-se as constantes de $\mu = 0,25$ e $C_d = 0,25$ conforme PITT et alii (1982).
6. A influência da velocidade de deslocamento do trator é desprezível

Para calcular o número de iterações, baseou-se no número de partículas totais, obtidas no ensaio de campo. Esta estimativa foi feita através da massa de partículas coletadas e sua respectiva granulometria.

3.2.2. Simulação

Visando otimizar a seqüência de cálculo da simulação da curva de distribuição do fertilizante, foi desenvolvido um programa em aplicativo Turbo Basic versão 1.0 utilizado em microcomputador de 16 bits padrão IBM/PC.

Basicamente a ativação do programa consiste em declarar a amplitude do movimento do tubo, o raio do tubo, o coeficiente de atrito entre o material do tubo e a partícula e a distância do tubo ao solo.

Terminada a seqüência de cálculo, o programa libera uma listagem da quantidade de partículas em cada recipiente coletor ao longo da faixa de distribuição.

A partir daí, os dados obtidos pela simulação foram processados em outro aplicativo, Quattro Pro, para comparação com os resultados do ensaio experimental e para a confecção de gráficos comparativos.

O fluxograma do desenvolvimento do programa bem como a listagem do mesmo encontra-se no apêndice 2.

3.2.3. Análise do Fertilizante

Os dados do fertilizante utilizado no ensaio experimental necessários para o estudo foram a análise granulométrica, diâmetro médio das partículas, massa específica das partículas e massa unitária da partícula por cada classe granulométrica.

O procedimento utilizado para a realização da análise granulométrica foi retirar uma amostra de 1 kgf do material e colocá-la no conjunto de peneiras e essas no agitador mecânico por um período de 1 minuto. Pesou-se, então, o material de cada classe granulométrica na balança eletrônica, obtendo-se, assim, a porcentagem de partículas em cada classe e o diâmetro médio ponderado das partículas, calculado a partir da média ponderada das partículas retidas em todas as malhas das peneiras granulométricas.

Para a obtenção da massa unitária das partículas em cada classe foi necessária a pesagem de uma amostra de 1000 partículas de cada classe. Para isso desenvolveu-se um contador eletrônico de partículas constituído de um funil, tubo condutor e um conjunto de sensores óticos formado por um fotodiodo e foto transistor

e um registrador digital. O esquema do aparelho encontra-se na figura 10, no apêndice 1.

3.2.4. Ensaio Experimental

A velocidade do vento foi determinada no momento do ensaio através de anemômetro de leitura direta. Já a temperatura e a umidade relativa foram obtidas a partir de boletins de informações emitidos pelo Departamento de Agrometeorologia da ESALQ/USP.

O ensaio foi realizado de tal forma que o conjunto trator-distribuidor passasse sobre os recipientes distribuídos transversalmente ao deslocamento da máquina, forrados com papel picado para minimizar o ricochete de partículas como mostra a figura 6.

Adotou-se um procedimento de coleta com 3 repetições sendo que, em cada repetição o material coletado foi pesado individualmente obtendo-se, como resultado final para cada recipiente coletor, a média das três repetições.

3.2.5. Metodologia de Análise dos Resultados

Dos resultados obtidos no ensaio de campo, efetuou-se comparações com os resultados da simulação segundo três aspectos: massa, frequência e número de partículas.

A partir da massa média obtida em cada recipiente no ensaio experimental, utilizou-se um fator de conversão de tal forma que pudesse ser calculado o número total de partículas distribuídas para que fosse introduzido este valor no modelo a fim de que pudessem ser simuladas as distâncias projetadas das partículas. O cálculo do fator de conversão foi gerado a partir da porcentagem de partículas em cada classe granulométrica e suas respectivas relações de massa/partícula.

Após os resultados das distâncias projetadas pelo modelo, os números de partículas para cada recipiente foram convertidos novamente em massa para serem comparados com os resultados do ensaio experimental. Uma comparação entre frequência de partículas também foi realizada, no entanto, a discussão dos resultados foi feita apenas sobre

os resultados de massa de partículas, procurando se ater mais às condições reais de trabalho.

Nas tabelas de resultados, convencionou-se as larguras de valores negativos correspondentes ao lado esquerdo da linha de deslocamento da máquina e as larguras de valores positivos ao lado direito da mesma.

Os parâmetros considerados para comparação das curvas experimental e simulada foram: larguras máximas obtidas, configuração e análise estatística das faixas distribuídas.

No primeiro caso, procurou-se observar as larguras máximas alcançadas pelas faixas simulada e experimental e determinar as diferenças percentuais em relação às massas de partículas distribuídas.

Quanto a configuração das faixas, procurou-se observar as tendências das curvas em relação à apresentação de picos nas extremidades calculando-se também as diferenças entre as faixas simulada e experimental.

Com relação à análise estatística, o que se verificou nos trabalhos estudados da revisão bibliográfica é que muitos pesquisadores ainda utilizam o coeficiente de variação para análise comparativa das curvas de distribuição. No entanto, o coeficiente de variação é um parâmetro que calcula os desvios dos pontos na mesma curva e nesse caso deseja-se calcular os desvios comparando-se as duas curvas. Pouca ou quase nenhuma análise mais aprofundada tem se encontrada nos trabalhos científicos com

comparações de curvas de distribuidores de fertilizantes.

Dessa forma, propôs-se uma análise estatística para o trabalho em questão estudando-se o desvio padrão para cada ponto e calculando-se o intervalo de confiança à nível de significância de 5 % e 1 %. Nesses cálculos levou-se em conta o número de repetições do ensaio experimental, calculando-se os limites superior e inferior do intervalo de confiança e projetando-se os valores obtidos no ensaio simulado.

Outra forma de análise de comparação de curvas pode ser obtida através do cálculo dos desvios absolutos em cada ponto da faixa distribuída. Nesse caso, analisa-se apenas as diferenças entre massas comparando cada recipiente às mesmas distâncias em relação ao centro da máquina.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Análise Granulométrica

Os resultados da análise granulométrica estão na tabela 1, a seguir.

Tabela 1. Resultados da Análise Granulométrica do Fertilizante

CLASSE		MASSA/PARTÍCULA
(mm)	%	(g)
4,76	0,16	0,0198
4,00	5,64	0,0196
3,36	18,84	0,0193
2,38	46,64	0,0190
2,00	18,79	0,0188
1,19	9,78	0,0187
1,00	-	-

A retenção máxima dos grânulos de fertilizantes deu-se na malha de 2.38 mm sendo que nenhum grânulo ultrapassou a malha de 1.19 mm, não verificando portanto nenhum material na malha de 1.00 mm. O diâmetro médio das partículas adotado no ensaio simulado foi de 2,47 mm.

4.2. Ensaio Experimental

As tabelas 2, 3 e 4 apresentam o resultados de massa, frequência e número de partículas respectivamente.

Tabela 2 - Resultados de Massa de Partículas entre os
Ensaio Experimental e Simulado

RECIPIENTE	LARGURA	EXPERIMENTAL	SIMULADO
	(m)	(g)	(g)
1	-6.4	0.2	-
2	-6.0	0.4	-
3	-5.6	1.1	-
4	-5.2	2.2	-
5	-4.8	4.2	18.8
6	-4.4	9.7	31.6
7	-4.0	23.0	19.5
8	-3.6	21.6	18.1
9	-3.2	16.2	13.9
10	-2.8	9.9	11.4
11	-2.4	10.5	9.6
12	-2.0	12.3	8.7
13	-1.6	13.0	6.9
14	-1.2	12.1	5.7
15	-0.8	10.9	4.7
16	-0.4	9.6	4.1
17	0.0	8.0	3.9
18	0.4	8.4	4.1
19	0.8	9.8	4.7
20	1.2	9.2	5.7
21	1.6	10.6	6.9
22	2.0	10.1	8.7
23	2.4	8.8	9.6
24	2.8	7.1	11.4
25	3.2	6.8	13.9
26	3.6	7.6	18.1
27	4.0	15.3	19.5
28	4.4	23.2	31.6
29	4.8	20.1	18.8
30	5.2	8.3	-
31	5.6	4.2	-
32	6.0	3.5	-
33	6.4	0.9	-
34	6.8	0.4	-

Tabela 3 - Resultados de Frequência de Partículas entre os
Ensaio Experimental e Simulado

RECIPIENTE	LARGURA	EXPERIMENTAL	SIMULADO
	(m)	(g)	(g)
1	-6.4	0.1	-
2	-6.0	0.1	-
3	-5.6	0.3	-
4	-5.2	0.7	-
5	-4.8	1.3	6.1
6	-4.4	3.1	10.2
7	-4.0	7.3	6.3
8	-3.6	6.8	5.8
9	-3.2	5.1	4.5
10	-2.8	3.1	3.7
11	-2.4	3.3	3.1
12	-2.0	3.9	2.8
13	-1.6	4.1	2.2
14	-1.2	3.7	1.8
15	-0.8	3.3	1.5
16	-0.4	2.9	1.3
17	0.0	2.5	1.3
18	0.4	2.7	1.3
19	0.8	2.8	1.5
20	1.2	2.9	1.8
21	1.6	3.3	2.2
22	2.0	3.2	2.8
23	2.4	2.8	3.1
24	2.8	2.2	3.7
25	3.2	2.1	4.5
26	3.6	2.4	5.8
27	4.0	4.8	6.3
28	4.4	7.3	10.2
29	4.8	6.3	6.1
30	5.2	2.6	-
31	5.6	1.3	-
32	6.0	1.1	-
33	6.4	0.3	-
34	6.8	0.1	-

Tabela 4 - Resultados de Número de Partículas entre os
Ensaio Experimental e Simulado

RECIPIENTE	LARGURA	EXPERIMENTAL	SIMULADO
	(m)	(g)	(g)
1	-6.4	11	-
2	-6.0	21	-
3	-5.6	58	-
4	-5.2	116	-
5	-4.8	221	988
6	-4.4	509	1663
7	-4.0	1207	1025
8	-3.6	1134	955
9	-3.2	850	734
10	-2.8	520	601
11	-2.4	551	503
12	-2.0	646	458
13	-1.6	682	365
14	-1.2	609	302
15	-0.8	546	250
16	-0.4	483	217
17	0.0	420	206
18	0.4	441	217
19	0.8	462	250
20	1.2	483	302
21	1.6	556	365
22	2.0	530	458
23	2.4	462	503
24	2.8	373	601
25	3.2	357	734
26	3.6	399	955
27	4.0	803	1025
28	4.4	1218	1663
29	4.8	1055	988
30	5.2	436	-
31	5.6	221	-
32	6.0	184	-
33	6.4	47	-
34	6.8	21	-

4.2.1. Largura da Faixa Distribuída

Os resultados obtidos da análise deste parâmetro mostraram que a amplitude total da faixa distribuída no ensaio experimental foi de 13,2 m e no ensaio simulado de 10,0 m.

Analisando-se em relação à massa de partículas, notou-se que a faixa excedente do ensaio experimental, ou seja, a diferença da largura alcançada pelo ensaio experimental em relação ao simulado, apresentou em ambos os lados da faixa, um acréscimo de 6,6 % da massa total distribuída. Na parte central da faixa, correspondente à 2 metros equidistantes à linha de deslocamento da máquina, houve também uma diferença entre as massas distribuídas. A diferença entre esses pontos apresentou um excedente de 14,8 % da massa total distribuída.

Outro fator estudado foram os picos de distribuição. Pelos resultados obtidos no lado direito da faixa, comprovou-se que tanto para o ensaio experimental como para o simulado, o pico máximo foi no mesmo ponto, ou seja à 4,4 m da linha de deslocamento da máquina. Para o

lado esquerdo, o pico do ensaio experimental se apresentou à 4.0 m e o simulado à 4.4 m da linha de deslocamento da máquina. Nesse caso, é provável que tenha ocorrido uma presença de vento o suficiente para deslocar o pico máximo da curva, já que teoricamente a faixa deve ser simétrica. Este fato pode confirmar as conclusões de SILVA (1982) que verificou uma influência de segregação em função de presença de vento em partículas com tamanhos inferiores a 2.0 mm já que na amostra foi constatado 28.57 % de partículas com tamanhos inferiores a 2.0 mm. Em ambas as extremidades da faixa, as massas obtidas para o ensaio simulado foram superiores ao ensaio experimental. Isso mostra que houve uma distribuição maior no ensaio experimental na região central da faixa o que provocou uma menor evidência de partículas distribuídas em ambos os picos.

Através da figura 11, pode-se ter uma comparação gráfica dos dados experimentais e simulados em relação à massa de partículas. Nota-se que apesar das observações levantadas anteriormente relativas às diferenças entre as curvas, estas apresentam a mesma tendência com picos de distribuição nos extremos da faixa e uma depressão na região central.

Figura 11 - Curva de Distribuição do Fertilizante: Experimental e Simulado

4.2.2. - Análise Estatística

As tabelas 5 e 6 e as figuras 12 e 13 apresentam os resultados dos limites superior e inferior do Intervalo de Confiança ao nível de significância de 5% e 1% comparados com os resultados obtidos para o ensaio simulado.

Tabela 5 - Limites Superior e Inferior de Intervalo de Confiança (I.C.) dos valores experimentais ao nível de significância de 5 % e valores simulados

RECIPIENTE	LARGURA	I.C. 5 %	I.C. 5 %	SIMULADO
	(m)	Lim. Sup.	Lim. Inf.	
		(g)	(g)	(g)
1	-6.4	0.9	-0.4	-
2	-6.0	1.1	-0.3	-
3	-5.6	1.8	0.3	-
4	-5.2	2.7	1.7	-
5	-4.8	5.5	2.8	18.8
6	-4.4	16.2	3.2	31.6
7	-4.0	45.0	1.0	19.5
8	-3.6	31.4	11.8	18.1
9	-3.2	38.7	-6.4	13.9
10	-2.8	10.4	9.5	11.4
11	-2.4	13.0	8.1	9.6
12	-2.0	16.1	8.5	8.7
13	-1.6	13.3	12.7	6.9
14	-1.2	12.5	11.6	5.7
15	-0.8	11.6	10.3	4.7
16	-0.4	10.4	8.8	4.1
17	0.0	8.6	7.4	3.9
18	0.4	9.3	8.3	4.1
19	0.8	9.7	8.7	4.7
20	1.2	10.7	10.5	5.7
21	1.6	10.9	9.4	6.9
22	2.0	11.8	5.8	8.7
23	2.4	9.8	4.4	9.6
24	2.8	8.8	4.9	11.4
25	3.2	10.5	4.6	13.9
26	3.6	27.3	3.3	18.1
27	4.0	37.8	8.5	19.5
28	4.4	37.1	3.2	31.6
29	4.8	13.8	2.8	18.8
30	5.2	6.0	2.5	-
31	5.6	4.8	2.1	-
32	6.0	1.3	0.5	-
33	6.4	1.2	-0.4	-
34	6.8	0.0	0.0	-

Tabela 6 - Limites Superior e Inferior de Intervalo de Confiança (I.C.) dos valores experimentais ao nível de significância de 1 % e valores simulados

RECIPIENTE	LARGURA	I.C. 1 %	I.C. 1 %	SIMULADO
	(m)	Lim. Sup.	Lim. Inf.	
		(g)	(g)	(g)
1	-6.4	1.7	-1.3	-
2	-6.0	2.1	-1.2	-
3	-5.6	2.8	-0.6	-
4	-5.2	3.4	1.0	-
5	-4.8	7.3	1.0	18.8
6	-4.4	24.7	-5.3	31.6
7	-4.0	73.7	-27.7	19.5
8	-3.6	44.3	-1.1	18.1
9	-3.2	68.2	-35.8	13.9
10	-2.8	10.9	8.9	11.4
11	-2.4	16.2	4.9	9.6
12	-2.0	21.2	3.4	8.7
13	-1.6	13.7	12.4	6.9
14	-1.2	16.5	6.6	5.7
15	-0.8	14.0	6.7	4.7
16	-0.4	11.6	6.8	4.1
17	0.0	9.4	6.6	3.9
18	0.4	9.7	7.1	4.1
19	0.8	9.9	7.6	4.7
20	1.2	10.3	8.0	5.7
21	1.6	11.9	8.4	6.9
22	2.0	15.7	1.8	8.7
23	2.4	13.4	0.8	9.6
24	2.8	11.3	2.4	11.4
25	3.2	14.3	0.8	13.9
26	3.6	43.1	-12.4	18.1
27	4.0	57.0	-10.6	19.5
28	4.4	59.2	-18.9	31.6
29	4.8	21.0	-4.4	18.8
30	5.2	8.3	0.1	-
31	5.6	6.7	0.2	-
32	6.0	1.9	0.0	-
33	6.4	2.2	-1.5	-
34	6.8	0.0	0.0	-

Figura 12 - Curva de Distribuição do Fertilizante: Simulado e Limites de Intervalo de Confiança com nível de significância ao nível de 5% dos dados experimentais

Figura 13 - Curva de Distribuição do Fertilizante: Simulado e Limites de Intervalo de Confiança com Nível de Significância de 1% dos dados experimentais

Nota-se que, nas extremidades os desvios entre os limites superiores e inferiores são bem maiores que na região central, chegando a ter limites inferiores negativos, mas que, logicamente são desprezados devido a impossibilidade de se ter massa negativa. Isso mostra que nessas zonas o desvio padrão dos pontos da faixa distribuída é mais elevado o que mostra a influência de fatores externos como a ação do vento, por exemplo, que provoca uma maior segregação das partículas. Este fato pode confirmar as conclusões de SILVA (1982) que verificou uma influência de segregação em função da presença de vento em partículas com tamanhos inferiores a 2,0 mm.

Tabela 7 - Desvios Absolutos dos Valores Experimentais em Relação ao Valores Simulados

RECIPIENTE	LARGURA (m)	Desvio Absoluto (%)
1	-4.8	346.8
2	-4.4	225.6
3	-4.0	15.3
4	-3.6	16.0
5	-3.2	13.9
6	-2.8	15.3
7	-2.4	8.9
8	-2.0	29.2
9	-1.6	46.7
10	-1.2	50.5
11	-0.8	54.3
12	-0.4	55.2
13	0.0	51.0
14	0.4	50.9
15	0.8	46.0
16	1.2	37.6
17	1.6	34.6
18	2.0	13.8
19	2.4	8.6
20	2.8	60.8
21	3.2	105.0
22	3.6	138.7
23	4.0	27.3
24	4.4	36.1
25	4.8	6.6

Calculando-se o desvio médio, obtido pela média aritmética dos desvios absolutos de toda a faixa, teve-se o valor de 59.8 %. A figura 14 ilustra graficamente os desvios absolutos comparados com o desvio médio calculado.

Figura 14 - Desvios Absolutos e Desvio Médio

Nota-se que o lado esquerdo da curva apresentou os maiores picos chegando a 350 %. Pode-se dizer que a interferência de um fator externo tal como a presença de ventos com velocidades variando de 0 a 0.5 m/s, contribuiu para deslocar o pico máximo do ensaio experimental proporcionando desvios maiores. Mas se for analisado a diferença entre massas distribuídas nesses pontos, obteve-se um total de 2.7 %. A partir de 4.0 m do lado esquerdo até 3.5 m do lado direito da curva, os desvios foram inferiores a 50 %, tendo outro pico somente no lado direito da curva com desvio de 150 % à 3.6 m.

5. CONCLUSÕES

Da observação dos dados e análise dos resultados pode-se concluir que o modelo de distribuição proposto conseguiu simular a faixa de distribuição experimental. As diferenças encontradas entre elas podem ser explicadas através das hipóteses assumidas:

- As partículas ao serem lançadas pela máquina sofrem impactos umas contra as outras desviando-se da sua trajetória inicial; o modelo assume que não há interação entre partículas;

- As partículas foram divididas em 6 classes granulométricas, de 1,19 mm a 4,76 mm. Para efeito do modelo obteve-se o diâmetro médio ponderado para assumir as partículas como esféricas;

- O registro da velocidade do vento acusou de 0 a 0,5 m/s no instante do ensaio ao passo que o modelo assume a velocidade nula;

- Os coeficientes aerodinâmicos utilizado foi o mesmo utilizado por PITT et alii (1982) que trabalharam com partículas esféricas e o coeficiente de atrito calculado entre a partícula e o disco de ferro. No caso em questão o material do tubo era de polietileno.

- Devido a inexistência de parâmetros que possa provar a veracidade do modelo pode-se propor através deste trabalho a comparação das curvas através dos desvios padrão ou médio, sendo que para um melhor ajuste da curva simulada, esta deve ter o desvio médio inferior à 59,8 % encontrado neste trabalho.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

RANEY, R.R. The Free Throw Theory of Thrower Discharge. (Unpublished paper 6098. 1946, U.S. 36 E, Greenville, OH, 45331.

PATTERNSON, D.E. & REECE, A.R. The Theory of the Centrifugal Distributor I: Motion on the Disc, near center feed. In: Journal of Agricultural Engineering Research, 1962, 7(3), 232-240.

CUNNINGHAM, F.M. Performance and Characteristics of Bulk Spreader for Granular Fertilizer. In: Transaction of the ASAE. Michigan, Sep 1963. vol. 6 (2), p. 108-114.

REED, W.B. & WACKER, E. Determining of the Distribution Pattern of Dry Fertilizer Applicators. In: ASAE Paper. Michigan, 1968. p. 68-606.

BERNACKI, H.; HAMAN, J.; KANAFOJSKI, C.Z. Agricultural Machines, Theory and Construction. 1972, vol. 1.

GLOVER, J. & BAIRD, J.V. Performance of Spinner Type Fertilizer Spreader. In: Transaction of the ASAE. Michigan, Jan/Feb 1973. vol. 16 (1), p. 48-51.

DAVIS, J.B. & RICE, C.E. Distribution of Granular Fertilizer and Wheat Seed by Centrifugal Distributors. In: Transaction of the ASAE. Michigan, 1973. vol. 17 (6), p. 867-868.

DAVIS, J.B. & RICE, C.E. Predicting Fertilizer Distribution by a Centrifugal Distributor using CSMP, a Simulation Language. In: Transaction of the ASAE. Michigan, 1974. vol. 17 (6), p. 109-110.

BRINSFIELD, R.B. & HUMMEL, J.W. Simulation of a New Centrifugal Distributor Design. In: Transaction of the ASAE. Michigan, Mar/Oct 1975. vol. 18 (2), p. 213-220.

GALILI, N. & SHTEINGAUZ, G. Wide-Swath Vertical Spreader for Granular Material. In: Transaction of the ASAE. Michigan, Sep/Oct 1982. vol. 25 (5), p. 1195-1203.

PITT, R.E.; FARMER, G.S.; WALCKER, L.P. Aproximating Equations for Rotary Distributor Patterns. In: Transaction of the ASAE. Michigan, Nov/Dec 1982. vol. 25 (6), p. 1544-1552.

SILVA, P.E.H. Capacidade de Trabalho e Uniformidade de Distribuição de Dois Distribuidores Centrífugos de Fertilizantes. Santa Maria, 1982. 182 p. (Mestrado - Universidade Federal de Santa Maria/UFSM).

GRIFFIS, C.L.; RITTER, D.W.; MATTHEWS, E.J. Simulation of Rotary Spreader Distribution Pattern. In: Transaction of the ASAE. Michigan, Jan/Feb 1983. vol. 26 (1), p. 33-37.

FAO. Informe Alimentário Mundial. Organização das Nações Unidas para a Agricultura. Roma, 1984, 64 p.

POPP,T. La importancia de la Calidad del Fertilizante para la Aplicación con Fertilizadoras. Basf Reports, 1985. vol. 2.

PARISH,R.L. Evaluation of Two Methods of Fertilizer Spreader Pattern Correction. In: ASAE Paper. Michigan, 1986. vol. 29 (02),p. 370-373.

SILVA,N.F.;CARDOSO,M.M.; BALASTREIRE,L.A.. Distribuidor de Tubo Oscilante: Simulação de Desempenho. Revista Engenharia Rural. Piracicaba, 1990. vol. 2, p. 56 - 76.

7. BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

WALPOLE, R.E. & MYERS, R.H. Probability and Statistics for Engineers and Scientists. 3.ed. New York, Macmillan, 1985. 639 p.

SISTEMA INTERNACIONAL DE UNIDADES. Instituto Nacional de Pesos e Medidas, 1985. 50 p.

ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA LUIZ DE QUEIRÓZ, Piracicaba - Comissão de Pós Graduação. Normas para a elaboração de Dissertação e Teses. Piracicaba, 1987. 64 p.

APÉNDICE 1

FIGURA I - ÂNGULO DESCRITO PELA PARTÍCULA NO DISCO.

Legenda:

R = RAIO DO DISCO.

α = POSIÇÃO DE QUEDA DA PARTÍCULA NO DISCO.

ϕ = ÂNGULO DE MOVIMENTO DA PARTÍCULA NO DISCO.

θ = ÂNGULO DE LANÇAMENTO DA PARTÍCULA.

FIGURA 2 ÂNGULOS E PARÂMETROS DA PARTÍCULA NO TUBO

Legenda:

α = amplitude.

β = ângulo aleatório.

ϕ = ângulo descrito pela partícula.

θ = ângulo de lançamento da partícula.

R = raio do tubo.

a = posição inicial da partícula no tubo.

FIGURA 3 - ILUSTRAÇÃO DA TRANSFERENCIA DE MOVIMENTO DO VOLANTE DA MÁQUINA PARA O TUBO.

R_v = Raio do volante, m

d = Distância do centro do volante ao ponto de inserção do tubo no distribuidor, m

β = Posição do tubo, rad

Ωt = Posição do volante, rad

Figura 4 - Variação da Posição do Tubo em relação à Posição do Volante da Máquina

Figura 5 - Variação da Velocidade do Tubo em relação à Posição do Volante

FIGURA 6 - POSIÇÃO DOS RECIPIENTES COLETORES NO CAMPO

FIGURA 8 - FATOR DE CORREÇÃO DA DISTÂNCIA (X_1)
PARA $\phi + \beta > \alpha/2$

FIGURA 9 - FATOR DE CORREÇÃO DA DISTÂNCIA (X_1)
PARA $\phi + \beta < \alpha/2$

FIGURA 10 - CONTADOR ELETRÔNICO DE PARTÍCULAS.

APÊNDICE 2

FLUXOGRAMA DE DESENVOLVIMENTO DO PROGRAMA

LISTAGEM DO PROGRAMA DESENVOLVIDO PARA UTILIZAÇÃO DO MODELO
MATEMÁTICO PARA SIMULAÇÃO DE UM DISTRIBUIDOR DE TUBO
OSCILANTE

```

DIM A(628,2)
dim b(628,2)
  cla0=0
  cla1=0
  cla2=0
  cla3=0
  cla4=0
  cla5=0
  cla6=0
  cla7=0
  cla8=0
  cla9=0
  cla10=0
  cla11=0
  cla12=0
  cla13=0
  cla14=0
  cla15=0
  cla16 = 0
  cla17 = 0
  cla18 = 0
  cla19 = 0
  cla20 = 0
  cla21 = 0
  cla22 = 0
  cla23 = 0
  cla24 = 0
  cla25 = 0
  cla26 = 0
  cla27 = 0
  cla28 = 0
  cla29 = 0
  cla30 = 0
  cla31 = 0
  cla32=0
cls
print" SIMULACAO DE DESEMPENHO DE DISTRIBUIDOR DE TUBO
OSCILANTE"
PRINT:PRINT
INPUT "RAIO,cm = ",R
INPUT "AMPLITUDE MAX.(rad) = ",A
INPUT "COEF. DE ATRITO = ", M
INPUT "ALTURA DE TRABALHO, m = ",HA
cls
FOR L=0 TO 628
  A(L,1)=atn(0.4866*cos(L/100))

  A(L,2)=ABS((-27.51*SIN(L/100))/(1+(0.4866*COS(L/100))^2))

NEXT L

```

```
FOR r1 = 35 TO 50 Step 0.6
```

```
FOR p=1 to 314
```

```
if p>314 then 800
```

```
b(p,1)= a(p,1)
```

```
Q=(R/R1)^2:Y=LOG((R/R1)+((Q-1)^0.5))
```

```
F1=Y
```

```
F1=0.45287-B(P,1)
```

```
G=F1+F1
```

```
LOCATE 1,46:PRINT "AMOSTRA =",r1,P
```

```
IF G>A THEN 500
```

```
H= 0.45287 - G
```

```
WU=A(P,2)
```

```
J=1
```

```
200 IF A(J,1)>h THEN J=J+1:GOTO 200
```

```
IF ABS(A(J,1)-h)<ABS(A(J-1,1)-h)THEN W=A(J,2):GOTO 220
```

```
W= A(J-1,2)
```

```
220 U=(Wu*(R/100)*(((M^2+1)^0.5)-M))
```

```
0=ATN(1/(((M^2+1)^0.5)-M))
```

```
D=2.0236-0-G
```

```
REM AERODINAMICA
```

```
V=SQR(W^2*(R/100)^2+U^2)
```

```
C=((8*1082.7*(0.00247/2))/(3*1.18*0.25))
```

```
Z=C*(LOG((V*(SQR(2*HA/9.81))/C)+1))
```

```
IF G>0.45287 THEN X=-Z*COS(D)+(SIN(G-0.45287)*0.5):GOTO 900
```

```
X=Z*COS(D)+(SIN(0.45287-G)*(-0.5))
```

```
goto 900
```

```
500 g1=A-(G-A)
```

```
H1=0.45287 - G1
```

```
WU=A(P,2)
```

```
J=1
```

```
700 IF A(J,1)>h1 THEN J=J+1:GOTO 700
```

```
IF ABS(A(J,1)-h1)<ABS(A(J-1,1)-h1)THEN W=A(J,2):GOTO 720
```

```
W= A(J-1,2)
```

```

720 U=(Wu*(R/100)*(((M^2+1)^0.5)-M))
0=ATN(1/(((M^2+1)^0.5)-M))
D=2.0236-0-(A-G1)

```

```

..... REM AERODINAMICA

```

```

V=SQR(W^2*(R/100)^2+U^2)

```

```

C=((8*1082.7*(0.00247/2))/(3*1.18*0.25))

```

```

Z=C*(LOG((V*(SQR(2*HA/9.81))/C)+1))

```

```

IF (A-G1)>0.45287 THEN

```

```

X=-(Z*COS(D)+(SIN((A-G1)-0.45287)*0.5)):GOTO 900
X=(Z*COS(D)+(SIN(0.45287-(A-G1))*(-0.5))

```

```

900 call distribFreq (x)

```

```

NEXT P

```

```

NEXT r1

```

```

color 7,1

```

```

locate 5,1: print "classes :      particulas"
locate 7,1:  print"-6.4  ";cla0
locate 8,1:  print"-6.0  ";cla1
locate 9,1:  print"-5.6  ";cla2
locate 10,1: print"-5.2  ";cla3
locate 11,1: print"-4.8  ";cla4
locate 12,1: print"-4.4  ";cla5
locate 13,1: print"-4.0  ";cla6
locate 14,1: print"-3.6  ";cla7
locate 15,1: print"-3.2  ";cla8
locate 16,1: print"-2.8  ";cla9
locate 17,1: print"-2.4  ";cla10
locate 18,1: print"-2.0  ";cla11
locate 19,1: print"-1.6  ";cla12
locate 20,1: print"-1.2  ";cla13
locate 21,1: print"-0.8  ";cla14
locate 22,1: print"-0.4  ";cla15
locate 7,18: print"0      ";cla16
locate 8,18: print"0.4    ";cla17
locate 9,18: print"0.8    ";cla18
locate 10,18: print"1.2    ";cla19
locate 11,18: print"1.6    ";cla20
locate 12,18: print"2.0    ";cla21
locate 13,18: print"2.4    ";cla22
locate 14,18: print"2.8    ";cla23
locate 15,18: print"3.2    ";cla24
locate 16,18: print"3.6    ";cla25
locate 17,18: print"4.0    ";cla26

```

```

locate 18,18: print"4.4  ";cla27
locate 19,18: print"4.8  ";cla28
locate 20,18: print"5.2  ";cla29
locate 21,18: print"5.6  ";cla30
locate 22,18: print"6.0  ";cla31
locate 23,18: print"6.4  ";cla32

```

```
PRINT " "
```

```
print "***** F I M *****"
```

```
call gravacao(file$)
```

```
sub gravacao (arquivo$)
```

```

shared inname$,cla0,cla1,cla2,cla3,cla4,cla5,cla6,cla7,cla8,
cla9,cla10,cla11,cla12,cla13,cla14,cla15,cla16,cla17,cla18,
cla19,cla20,cla21,cla22,cla23,cla24,cla25,cla26,cla27,cla28,
cla29,cla30,cla31,cla32

```

```
input "Nome do arquivo";inname$
```

```
arquivo$=left$(inname$,8) + ".sim"
```

```
open arquivo$ for append as #1
```

```

write#1,cla0,cla1,cla2,cla3,cla4,cla5,cla6,cla7,cla8,cla9,
cla10,cla11,cla12,cla13,cla14,cla15,cla16,cla17,cla18,cla19,
cla20,cla21,cla22,cla23,cla24,cla25,cla26,cla27,cla28,cla29,
cla30,cla31,cla32

```

```
close #1
```

```
'LOCATE 23,1:LPRINT "ARQUIVO = ";INNAME$;".SIM"
```

```
end sub
```

```
sub distribFreq (var)
```

```
color 31,1
```

```
' locate 1,2:print"PROCESSANDO, aguarde..."
```

```

shared,cla0,cla1,cla2,cla3,cla4,cla5,cla6,cla7,cla8,cla9,
cla10,cla11,cla12,cla13,cla14,cla15,cla16,cla17,cla18,cla19,
cla20,cla21,cla22,cla23,cla24,cla25,cla26,cla27,cla28,cla29,
cla30,cla31,cla32

```

```
select case var
```

```
case -6.4 to -6.0
```

```
cla0 = cla0+1
```

```
case -6.0 to -5.6
```

```
cla1 = cla1+1
```

```
case -5.6 to -5.2
```

```
cla2 = cla2+1
```

```
case -5.2 to -4.8
```

```
cla3 = cla3+1
```

```
case -4.8 to -4.4
```

```
cla4 = cla4+1
```

```
case -4.4 to -4.0
  cla5 = cla5+1
case -4.0 to -3.6
  cla6 = cla6+1
case -3.6 to -3.2
  cla7 = cla7+1
case -3.2 to -2.8
  cla8 = cla8+1
case -2.8 to -2.4
  cla9 = cla9+1
case -2.4 to -2.0
  cla10 = cla10+1
case -2.0 to -1.6
  cla11 = cla11+1
case -1.6 to -1.2
  cla12 = cla12+1
case -1.2 to -0.8
  cla13 = cla13+1
case -0.8 to -0.4
  cla14 = cla14+1
case -0.4 to 0.0
  cla15 = cla15 +1
case 0.0 to 0.4
  cla16= cla16+1
case 0.4 to 0.8
  cla17= cla17+ 1
case 0.8 to 1.2
  cla18= cla18+ 1
case 1.2 to 1.6
  cla19 = cla19 + 1
case 1.6 to 2.0
  cla20 = cla20 + 1
case 2.0 to 2.4
  cla21 = cla21 +1
case 2.4 to 2.8
  cla22 = cla22 +1
case 2.8 to 3.2
  cla23 = cla23 +1
case 3.2 to 3.6
  cla24 = cla24 +1
case 3.6 to 4.0
  cla25 = cla25 +1
case 4.0 to 4.4
  cla26 = cla26 +1
case 4.4 to 4.8
  cla27 = cla27 +1
case 4.8 to 5.2
  cla28 = cla28 +1
case 5.2 to 5.6
  cla29 = cla29 +1
case 5.6 to 6.0
  cla30 = cla30 +1
case 6.0 to 6.4
  cla31 = cla31 +1
case 6.4 to 6.8
```



```
      cla32 = cla32 +1  
end select  
end sub
```