

**UFRRJ**  
**INSTITUTO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA**  
**QUÍMICA**  
**TECNOLOGIA QUÍMICA**

**DISSERTAÇÃO**

**SECAGEM UTILIZANDO EXAUSTOR**  
**EÓLICO**

**Jorge Mauler Júnior**  
**2004**



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**SECAGEM UTILIZANDO EXAUSTOR EÓLICO**

**JORGE MAULER JÚNIOR**

*Sob a Orientação da Professora*  
**Cláudia Miriam Scheid**  
*e Co-orientação do Professor*  
**Luís Américo Calçada**

Dissertação submetida como requisito parcial  
para obtenção do grau de **Magister Scientiae**  
em Engenharia Química, Área de  
Concentração Tecnologia Química.

Seropédica, RJ  
Novembro de 2004

664.0284

M449s

T

Mauler Júnior, Jorge, 1975 -

Secagem utilizando exaustor eólico / Jorge Mauler Júnior. - 2004.

72f. : il.

Orientador: Cláudia Miriam Scheid.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Instituto de Tecnologia.

Bibliografia: f. 52.

1. Secagem - Equipamentos e acessórios – Teses. 2. Produtos agrícolas – Secagem – Equipamentos e acessórios - Teses. 3. Produtos agrícolas – Desidratação – Equipamento e acessórios - Teses. 4. Energia eólica – Teses. I. Scheid, Cláudia Miriam. II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Instituto de Tecnologia. III. Título.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO  
INSTITUTO DE TECNOLOGIA  
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**JORGE MAULER JÚNIOR**

Dissertação submetida ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, área de Concentração em Tecnologia química, como requisito parcial para obtenção do grau de **Magister Scientiae**, em Engenharia química,

DISSERTAÇÃO APROVADA EM \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

---

Prof. Cláudia Miriam Scheid, D.Sc. DEQ/UFRRJ

---

Prof. Luís Américo Calçada, D.Sc. DEQ/UFRRJ

---

Prof. Oswaldo Curty da Motta Lima, D.Sc. DEQ/UEM

---

Pesquisadora Glória Regina da Silva Wildhagen, D.Sc. IEN/CNEN

## AGRADECIMENTOS

Agradeço:

A Deus como fonte absoluta do que sou hoje, do que fui ontem e de que serei amanhã.

A minha orientadora e amiga Cláudia, a qual sempre contei como exemplo de seriedade, disciplina e de força de vontade. Muito obrigado por acreditar em mim e por guiar meus passos que por muitas vezes mostraram-se trôpegos e vagos.

Ao meu amigo e co-orientador Luís Américo pelo sempre presente bom-humor, pela sua fé e sinceridade desde os tempos de graduação.

Aos meus amigos do LSP e em especial ao Léo e ao Patrick que foram amigos de batalha durante os meses de trabalho. Desejo-lhes todo o sucesso que sua mente e seus corações merecem.

Ao amigo Maurício pela amizade sincera e verdadeira desde os tempos de graduação. Continue sempre acendendo a centelha do interesse pela ciência nos corações juvenis que procuram a universidade. Muito obrigado por acreditar no meu trabalho.

Ao professor Giulio Massarani (IN MEMORIAM) pela idéia esplêndida de usar um exaustor eólico simples e de uma forma tão genial.

Aos meus pais, minhas irmãs e meu sobrinho com que sempre pude contar nos momentos de necessidade de apoio. Eu amo todos vocês mamãe Leonides, papai Jorge, Cinthia, Monique e Felipe.

A minha Luciana, esposa querida que com seu exemplo de perseverança, paz e cooperação fizeram a minha caminhada mais suave, é para você meu maior obrigado minha companheira.

A todos que colocaram ao menos um sorriso e uma palavra amiga neste trabalho de dissertação meu muito obrigado.

“Minha religião consiste numa humilde admiração pelo ilimitável espírito superior que revela-se nos detalhes menosprezados pelas nossas frágeis e fracas mentes”

Albert Einstein

## SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	1
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 - Exaustão eólica.....	3
2.2 - Máquinas de fluxo e sua caracterização.....	6
2.3 - Máquinas movidas pelo vento.....	8
2.4 - Efeito chaminé.....	10
2.5 - Caracterização do exaustor eólico.....	12
2.6 - Secagem.....	14
2.7 - Potencial eólico.....	15
3 - MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1 - O Exaustor eólico.....	17
3.2 - A unidade experimental.....	17
3.3 - Equipamentos de medida.....	18
3.4 - Obtenção das curvas características.....	19
3.4.1 - Levantamento da curva velocidade do vento-RPM.....	19
3.4.2 - Levantamento da curva vazão mássica de ar-RPM.....	19
3.4.3 - Levantamento das curvas vazões mássicas de ar-quedas de pressão...	21
3.5 - Avaliação do efeito chaminé.....	22
3.6 - Secagem.....	22
3.6.1 - Secagem de capim limão ( <i>Cymbopogon citratus</i> ).....	23
3.6.2 - Secagem de abacaxi ( <i>Ananas comosus L. Merril</i> ).....	23
3.6.3 - Secagem de sementes de tomate ( <i>Lycopersicum esculentum</i> ).....	24
3.7 - Obtenção do potencial eólico da região.....	24
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
4.1 - Curvas características do exaustor.....	25
4.1.1 - Curva vazão mássica de ar-número de rotações.....	25
4.1.2 - Curva velocidade do vento-número de rotações.....	25
4.1.3 - Vazão mássica de ar-velocidade do vento.....	33
4.1.4 - Vazão mássica de ar-queda de pressão.....	34
4.2 - Avaliação do efeito chaminé.....	35
4.3 - Secagem.....	42

4.3.1 - Secagem de capim-limão ( <i>Cymbopogon citratus</i> ).....	42
4.3.2 - Secagem de abacaxi ( <i>Ananas comosus L. Merrill</i> ).....	44
4.3.3 - Secagem de sementes de tomate ( <i>Lycopersicum esculentum</i> ).....	47
4.4 - Obtenção do potencial eólico da região.....	48
5 - CONCLUSÕES.....	50
6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	51
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
8 - APÊNDICES.....	53
9 - ANEXOS.....	72

## ÍNDICE DE TABELAS

<b>Tabela 1</b> - Dados da empresa LUFTMAXI à respeito do funcionamento dos exaustores disponíveis pela empresa no mercado.....	5
<b>Tabela 2</b> - Equipamentos experimentais de medida.....	19
<b>Tabela 3</b> - Variações de temperatura entre o ambiente externo e a unidade experimental durante os experimentos com aquecimento.....	21
<b>Tabela 4</b> - Dados experimentais relacionando número de rotações e velocidades médias do vento incidente no exaustor.....	32
<b>Tabela 5</b> - Vazões mássicas impelidas pelo exaustor eólico e suas velocidades do vento.....	34
<b>Tabela 6</b> - Valores de variação de pressão provenientes das Equações 10 e 11 (efeito inercial + chaminé (Perry & Chilton)) e (efeito inercial + chaminé (Boulard & Baille)) e para o experimento com aquecimento na unidade experimental. ....	39
<b>Tabela 7</b> - Valores de vazão mássica de ar na unidade experimental para os experimentos com aquecimento e a partir da aplicação da Equação 13, e os seus respectivos desvios.....	41
<b>Tabela 8</b> - Condições operacionais dos experimentos de secagem.....	42
<b>Tabela 9</b> - Velocidade média do vento para os meses de coleta de dados.....	49

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Instalação típica de exaustores eólicos.....	3
<b>Figura 2</b> - Aerador eólico tipo turbina.....	4
<b>Figura 3</b> - Exaustor eólico tipo cogumelo fornecido pela empresa LUFTMAXI.....	4
<b>Figura 4</b> - Esquema do exaustor eólico.....	5
<b>Figura 5</b> - Curva de desempenho para a bomba Perless 16AE183 a 880 rpm.....	7
<b>Figura 6</b> - Curva de desempenho para um ventilador da empresa Bufallo.....	7
<b>Figura 7</b> - Moinho de vento tradicional holandês.....	8
<b>Figura 8</b> - Moinho de vento das fazendas americanas.....	9
<b>Figura 9</b> - Turbina de vento de eixo horizontal.....	10
<b>Figura 10</b> - Curvas características quedas de pressão-vazões mássicas de ar para o exaustor utilizado por Scheid et al (2002).....	12
<b>Figura 11</b> - Curva característica velocidade do vento-RPM para o exaustor utilizado por Scheid et al. (2002).....	13
<b>Figura 12</b> - Estudo da influência de temperatura nos experimentos de Scheid et al. (2002).....	14
<b>Figura 13</b> - Secador de frutas desenvolvido pela EMBRAPA.....	15
<b>Figura 14</b> - Mapa do potencial eólico brasileiro efetuado em 1998.....	16
<b>Figura 15</b> - Dimensões do exaustor.....	17
<b>Figura 16</b> - Unidade experimental.....	18
<b>Figura 17</b> - Resistências de aquecimento.....	18
<b>Figura 18</b> - Aparato experimental montado para obtenção da curva velocidade do vento-RPM.....	19
<b>Figura 19</b> - Conformação frontal dos pontos de medição de velocidade adotados para promover a simulação da ação do vento, tendo como referência o ventilador axial.....	20
<b>Figura 20</b> - Célula de secagem vertical.....	22
<b>Figura 21</b> - Unidade tradicional de secagem em leito fixo.....	23
<b>Figura 22</b> - Curva característica vazão mássica de ar-RPM.....	25
<b>Figura 23</b> - Gráfico do perfil de impacto de velocidade do vento com um distanciamento do suporte para anemômetro de 60 cm.....	26
<b>Figura 24</b> - Gráfico do perfil de impacto da velocidade do vento para um distanciamento do suporte para anemômetro de 80 cm.....	27

<b>Figura 25</b> - Gráfico do perfil de impacto de velocidade do vento com um distanciamento do suporte para anemômetro de 100 cm.....	27
<b>Figura 26</b> - Gráfico do perfil de impacto de velocidade do vento com um distanciamento do suporte para anemômetro de 120 cm.....	28
<b>Figura 27</b> - Gráfico do perfil de impacto de velocidade do vento com um distanciamento do suporte para anemômetro de 140 cm.....	28
<b>Figura 28</b> - Gráfico do perfil de impacto de velocidade do vento com um distanciamento do suporte para anemômetro de 160 cm.....	29
<b>Figura 29</b> - Gráfico do perfil de impacto de velocidade do vento com um distanciamento do suporte para anemômetro de 180 cm.....	29
<b>Figura 30</b> - Gráfico do perfil de impacto de velocidade do vento com um distanciamento do suporte para anemômetro de 200 cm.....	30
<b>Figura 31</b> - Gráfico do perfil de impacto de velocidade do vento com um distanciamento do suporte para anemômetro de 220 cm.....	30
<b>Figura 32</b> - Gráfico do perfil de impacto de velocidade do vento com um distanciamento do suporte para anemômetro de 240 cm.....	31
<b>Figura 33</b> - Gráfico do perfil de impacto de velocidade do vento com um distanciamento do suporte para anemômetro de 260 cm.....	31
<b>Figura 34</b> - Gráfico do perfil de impacto de velocidade do vento com um distanciamento do suporte para anemômetro de 280 cm.....	32
<b>Figura 35</b> - Curva característica velocidade do vento-RPM.....	33
<b>Figura 36</b> - Curva característica vazão mássica de ar-velocidade do vento.....	34
<b>Figura 37</b> - Curvas características quedas de pressão-vazões mássicas de ar para 60, 80, 100, 125 e 140 RPM.....	35
<b>Figura 38</b> - Vazões mássicas para experimentos com aquecimento e sem aquecimento utilizando rotações de 60, 70, 80, 90, 100, 110 e 125 RPM.....	36
<b>Figura 39</b> - Variação de pressão para os experimentos sem e com aquecimento na unidade experimental para rotações de 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 RPM.....	37
<b>Figura 40</b> - Variação de pressão para o experimento com aquecimento e aplicando as equações 10 e 11 na unidade experimental para rotações de 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 RPM.....	38
<b>Figura 41</b> - Vazões mássicas para o uso da equação 12 (equação de macyntire + equação obtida sem aquecimento) e para experimento com aquecimento.....	40

<b>Figura 42</b> - Vazões mássicas pelo uso da equação 13 e para experimentos com aquecimento.....	41
<b>Figura 43</b> - Curvas de secagem de capim-limão utilizando exaustor eólico em 70 RPM e com velocidade do ar de 0,8 m/s, para secagem em leito fixo com velocidade do ar de 0,8 m/s e em estufa. Os experimentos foram efetuados em temperaturas médias de 36,6; 36,0 e 37,2 °C respectivamente.....	43
<b>Figura 44</b> - Curvas de secagem de capim-limão utilizando exaustor eólico em 100 RPM e com velocidade do ar de 1,16 m/s, para secagem em leito fixo com velocidade de ar de 1,16 m/s e em estufa. Temperaturas médias de 36,6; 36,0 e 37,2 °C respectivamente.....	43
<b>Figura 45</b> - Curvas de secagem de capim-limão utilizando exaustor eólico em 100 RPM e velocidade do ar de 1,16 m/s e 70 RPM com velocidade de 0,8 m/s.....	44
<b>Figura 46</b> - Curvas de secagem de abacaxi utilizando exaustor eólico em 70 rpm e com velocidade do ar de 0,8 m/s, para secagem em leito fixo com velocidade de ar de 0,8 m/s e em estufa. Os experimentos foram efetuados em temperaturas médias de 36,6 °C; 36,0 °C e 37,2 °C respectivamente.....	45
<b>Figura 47</b> - Curvas de secagem de abacaxi utilizando exaustor eólico em 100 RPM e com velocidade do ar de 1,16 m/s, para secagem em leito fixo com velocidade de ar de 1,16 m/s e em estufa. Temperaturas médias de 36,6; 36,0 e 37,2 °C respectivamente.....	46
<b>Figura 48</b> - Curvas de secagem de abacaxi utilizando exaustor eólico em 100 RPM e com velocidade do ar de 1,16 m/s e para exaustor eólico utilizando 70 RPM com velocidade de 0,8 m/s.....	47
<b>Figura 49</b> - Curva de secagem de sementes de tomate em rotações de exaustor de 70 e 100 RPM e em estufa. Sob temperaturas médias de 46,3°C, 46,3°C e 47,1°C, respectivamente.....	48
<b>Figura 50</b> - Dados referentes à coleta de velocidades do vento na região de Seropédica (RJ).....	49

## NOMENCLATURA

A1	Coefficiente de descarga (adimensional)
P	Pressão [ $ML^{-1}T^{-2}$ ]
C	Coefficiente médio de pressão de vento laminar (adimensional)
$\bar{C}$	Coefficiente médio de pressão de vento turbulento (adimensional)
Q	Vazão volumétrica de ar [ $L^3T^{-1}$ ]
A	Área da abertura [ $L^2$ ]
H	Altura da abertura [L]
T	Temperatura [ $\theta$ ]
R	Raio de abertura [L]
V	Velocidade ao longo da abertura [ $LT^{-1}$ ]
P	Pressão [ $ML^{-1}T^{-2}$ ]
L	Largura de abertura [L]
f	Fator de atrito
D	Diâmetro de abertura [L]

## LETRAS GREGAS

$\zeta$	Coefficiente de queda de pressão (adimensional)
$v(y)$	Velocidade do vento [ $LT^{-1}$ ]
$\rho$	Densidade do ar [ $ML^{-3}$ ]
$\Delta$	Varição
$\mu$	Velocidade do ar na saída de chaminé [ $LT^{-1}$ ]

## SUBSCRITOS

i	Interna
e	Externa
C	Relativo ao efeito chaminé
B	Barométrica
I	Inercial
t	Efeito inercial + efeito de temperatura
g	Gás
w	Laminar + turbulento
T	Teórica
R	Real
F	Referente a perdas por atrito

## RESUMO

MAULER JÚNIOR, Jorge. **Secagem utilizando exaustor eólico**. Seropédica: UFRRJ, 2004. (Dissertação, Mestrado em Engenharia Química, Tecnologia Química).

Nos sistemas mais comuns de secagem são utilizados equipamentos de propulsão de ar tais como os tradicionais sopradores. O trabalho atual tem como objetivo estudar o comportamento do exaustor eólico em sistemas de secagem. O sistema proposto minimiza custos e estaria mais acessível aos pequenos agricultores, já que o exaustor eólico é um equipamento de fácil aquisição, econômico e de funcionamento simples. Para a análise da viabilidade do seu uso, foi feita a caracterização de um exaustor eólico de 800 mm de altura e 960 mm de diâmetro da região aletada, a partir da obtenção das curvas vazão mássica de ar-velocidade do vento e vazão de ar-queda de pressão. Também foi estudada a contribuição da ação da temperatura na propulsão de ar gerada pelo exaustor, uma vez que o mesmo é movido pela ação do vento e do chamado empuxo térmico promovido pela diferença de temperaturas entre o interior e o exterior do equipamento. Este trabalho compreende também ensaios de secagem com o objetivo de comparar a secagem utilizando exaustor eólico com metodologias de secagem convencionais em leito fixo e estufa. Produtos de fácil acesso e comuns na região foram adotados para os testes e consistiam de capim-limão, abacaxi e sementes de tomate, sendo utilizada secagem em leito fixo convencional para abacaxi e capim-limão e da secagem em estufa para os três materiais. Os resultados se mostraram satisfatórios para as condições de velocidade do ar e temperaturas adotadas, onde a umidade do produto teve quedas satisfatórias quando comparada às outras metodologias. Foram efetuadas medições de velocidade do vento na região com a finalidade de obter informações sobre o potencial eólico disponível para aplicação do exaustor eólico para secagem.

**Palavras chave:** Secagem, exaustor eólico, vento, potencial eólico.

## ABSTRACT

MAULER JÚNIOR, Jorge. **Drying using aeolian exhaust fan**. Seropédica: UFRRJ, 2004. (Dissertation, Master Science Degree in Chemical Engineering, Chemical Technology).

In common systems of drying are used air propellers like traditional blowers. This work has the aim to study exhaust eolic behavior in drying systems. The system proposed decreases expenses and would be more accessible to little farmers. The eolic exhaust fan is an easy acquisition equipment, economic and of simple operation. To analyze this equipment was made the characterization of a fan with 800 millimeters of height and 960 millimeters of diameter. It was made through the relations between air flow-wind velocity and air flow-pressure drop. The contribution of temperature action to the air flow which moves the fan was studied because this equipment is moved by wind action and by the natural convective flow generated by the difference of the temperatures between inside and outside the equipment. This work also comprehend drying experiments with the aim of comparing drying using eolic fan and using conventional equipment like fixed bed and plate warmer dryers. Products of easy access and commons in the region were adopted. They were *Cymbopogan citratus*, pineapple and tomato seeds. The experiments were composed by drying testes in a fixed bed dryer for tomato seeds and pineapple and dying tests for tomato seeds, *Cymbopogan citratus* and pineapple in a plate warmer. The results were satisfactory for our conditions of air velocity and air temperature, and the product humidity had a great fall when compared with the others drying systems used. Wind velocity was measured on the region of Seropédica (RJ), with the aim of knowing some information about the eolic potential to apply the eolic fan dying system.

**Keywords:** drying, eólic exhaust fan, wind

## 1 - INTRODUÇÃO

Durante sua história, o homem soube aproveitar a energia do vento para executar uma série de trabalhos. Os usos mais tradicionais incluem os moinhos de vento usados na moagem, irrigação e bombeamento de água chegando à produção de energia elétrica. Nos dias de hoje, em busca de fontes de energia renováveis, de menor impacto ambiental e mais baratas, estuda-se a possibilidade de substituir a energia convencional, comumente utilizada em diversos processos industriais, pela energia eólica.

A secagem representa uma operação unitária de significativa importância na indústria química e de alimentos. Produtos com altos teores de umidade são mais facilmente sujeitos à degradação. Um meio úmido cria condições propícias ao surgimento de fungos, microorganismos e insetos nocivos o que acarreta problemas de conservação. A umidade também acarreta aumento de massa e volume implicando em possíveis problemas de transporte e armazenamento (Lima e Rocha, 1995).

As metodologias de secagem artificial podem ser conduzidas de diferentes formas, dependendo do sistema e do equipamento utilizado para realizar a secagem. Entre os secadores mais comuns tem-se: secadores em leito fixo, em leito de jorro, em leito fluidizado e secador de bandejas (Brooker et al., 1974). Em grande parte dos secadores convectivos, com exceção da secagem natural, a insuflação de ar é feita com o uso de sopradores elétricos convencionais.

Neste trabalho, a proposta é avaliar a utilização de um exaustor eólico como opção na substituição do soprador elétrico para suprimento de ar, com o objetivo de reduzir os custos de produção durante a operação de secagem, reduzindo custos no processamento agrícola para produtores de pequeno porte.

O exaustor eólico é largamente utilizado para ventilação e circulação de ar em ambientes. Apresenta como vantagens a não produção de ruído, a sua fácil aplicação, o baixo custo de aquisição e o funcionamento ininterrupto sem custo de manutenção, representando assim uma alternativa econômica.

Com a finalidade de verificar a faixa operacional que possibilite a substituição do soprador elétrico pelo exaustor eólico na secagem, as curvas de caracterização do exaustor tornam-se essenciais para tal estudo, sejam elas: vazão mássica de ar-velocidade do vento e vazão mássica de ar-queda de pressão.

Neste trabalho é caracterizado um exaustor eólico do tipo cogumelo adquirido da empresa LUFTMAXI com altura de 80 cm e diâmetro da região aletada de 96 cm, sendo este o de maiores dimensões fabricado pela empresa, permitindo assim a obtenção de maiores faixas operacionais de vazão mássica de ar destinado à secagem.

São estudados também os efeitos da contribuição da temperatura e do efeito inercial relacionados com a propulsão do exaustor eólico, sejam eles o empuxo térmico proveniente da diferença de densidade entre o interior e o exterior do equipamento e o efeito inercial de propulsão ocasionado pela ação do vento respectivamente.

Foram realizados ensaios de secagem com a unidade experimental, provida de resistências de aquecimento, com o objetivo de testar o comportamento do exaustor eólico. Foram escolhidos para os ensaios capim-limão, abacaxi e sementes de tomate. Com o objetivo de avaliar comparativamente a secagem via exaustor eólico, foram realizados também ensaios de secagem em sistemas usuais. Estes sistemas consistiam de secagem em leito fixo e uso de secagem em estufa. Foi avaliada também a influência da velocidade superficial de ar de secagem para os diferentes produtos.

## 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A busca de formas alternativas de energia tem sido foco de diversos estudos científicos, podendo-se citar o uso das energias eólica e solar fontes renováveis de energia. A necessidade desta busca se dá em função de diversos motivos, dentre os quais:

- necessidade de tecnologias chamadas "limpas", sem prejuízo ao meio ambiente;
- necessidade de contenção de gastos;
- intuito de promover meios de acesso tecnológico aos pequenos investidores.

O uso da energia eólica através do exaustor representa uma alternativa econômica e limpa em concordância com as características citadas.

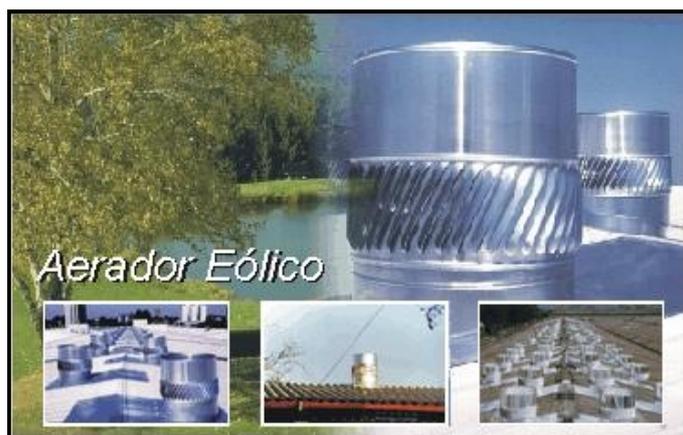
### 2.1 - Exaustão eólica

A Figura 1 ilustra o uso típico dos exaustores eólicos os quais são utilizados na renovação e circulação do ar ambiente em locais fechados. O sistema de ventilação/exaustão eólica promove a retirada de ar quente do ambiente, melhorando consideravelmente o conforto térmico e a qualidade do ar. Auxilia também a retirada de fumaça, umidade e particulados em suspensão.



**Figura 1** - Instalação típica de exaustores eólicos.

O exaustor eólico é um equipamento construído em alumínio, durável e de custo de manutenção zero, constituindo uma alternativa econômica de aproveitamento da energia eólica. Sua ação é devida a correntes de ar ascendentes por convecção natural e pela ação do vento nas aletas. São encontrados comercialmente exaustores de diferentes tamanhos e geometrias. Modelos tipo turbina, como o mostrado na Figura 2, não móveis, onde a geometria fixa unicamente encarrega-se da exaustão de ar e móveis, do tipo cogumelo, iguais ao utilizado neste trabalho.

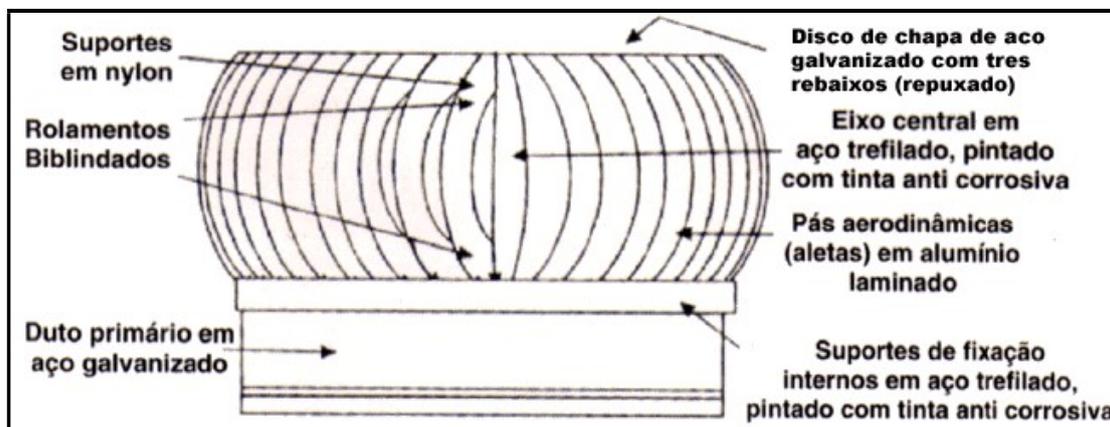


**Figura 2** - Aerador eólico tipo turbina.

Na Figura 3 tem-se um exaustor eólico do tipo cogumelo, modelo LM-60 fabricado pela empresa LUFTMAXI. A Figura 4 apresenta características técnicas deste exaustor.



**Figura 3** - Exaustor eólico tipo cogumelo fornecido pela empresa LUFTMAXI.



**Figura 4** - Esquema do exaustor eólico.

De acordo com o fabricante, as vantagens da utilização deste modelo de exaustor se dão em função dos itens citados abaixo:

- Fabricado totalmente em alumínio - longa vida útil.
- Baixo custo inicial.
- Não deposita e/ou suspende pó/poeira - poluição ambiental zero.
- Poluição sonora zero.
- Não há consumo de energia - custo operacional zero.
- Funcionamento constante - renovação permanente do ar, dia e noite.
- Remove o ar quente no verão e a umidade no inverno.
- Elevação dos índices de conforto térmico.
- Redução da carga térmica gerada pelo processo produtivo.
- Redução do calor sensível.

A Tabela 1 mostra dados da empresa LUFTMAXI trazendo as vazões volumétricas de ar movimentadas para as respectivas velocidades do vento incidentes nas aletas do equipamento. São mostrados os modelos LM-60 e LM-40, com dimensões distintas.

**Tabela 1** - Dados da empresa LUFTMAXI a respeito do funcionamento de seus exaustores disponíveis no mercado.

MODELO	ÁREA BASE (m <sup>2</sup> )	VAZÃO (m <sup>3</sup> /h)			
		5 km/h	10 km/h	15 km/h	20 km/h
LM-60	0,26	3.300	4.000	4.500	6.000
LM-40	0,13	1.800	1.800	2.100	3.000

O tema exaustão eólica possui material bibliográfico limitado. Muitas das referências para esse tipo de estudo são sobre artigos de ventilação, sobre construções e *sites* comerciais relativos a exaustores eólicos. A seguinte revisão refere-se a caracterizações usuais de equipamentos de fluxo de ar, técnicas de medição de vazão através de aberturas, contribuições da ação do vento e avaliação de efeitos térmicos em correntes de ar ascendentes.

## **2.2 - Máquinas de fluxo e sua caracterização**

O estudo das máquinas de fluxo faz-se necessário visto que o exaustor eólico deve ser classificado como um integrante desta classe, movimentando uma corrente fluida de ar. A sua caracterização, tal qual as efetuadas para bombas e ventiladores, deve ser feita no que diz respeito ao seu potencial para secagem.

Segundo Fox (1995), as máquinas de fluxo podem ser classificadas, de um modo geral, como de deslocamento positivo ou dinâmicas. Os dispositivos de fluxo que direcionam o fluido com pás, aletas, ou palhetas, fixadas num elemento rotativo são denominados turbomáquinas. Todas as interações de trabalho numa turbomáquina resultam de efeitos dinâmicos do rotor sobre a corrente de fluido.

Uma distinção entre os tipos de turbomáquinas tem por base a geometria de percurso do fluido. Nas máquinas de fluxo radial, a trajetória do fluxo é essencialmente radial, com mudanças significativas de raio, da entrada para a saída. Nas máquinas de fluxo axial, a trajetória do fluido é aproximadamente paralela à linha de centro da máquina e o raio do percurso não varia significativamente.

As máquinas que adicionam energia a uma corrente fluida são chamadas de bombas, quando o fluido é líquido ou pastoso, e ventiladores, sopradores ou compressores, quando o fluido é gás ou vapor. Os ventiladores geralmente têm pequeno aumento de pressão e os sopradores têm aumento de pressão moderado; bombas e sopradores podem ter aumentos de pressão muito grandes.

O desempenho completo de uma máquina real, incluindo a operação em condições fora das previstas pelo projeto, deve ser determinado experimentalmente. Para determinar o desempenho de uma bomba, ventilador, soprador ou compressor deve ser montada, uma bancada de testes com instrumentos, capazes de medir vazão, velocidade, torque absorvido e aumento de pressão, sendo o teste realizado de acordo com um procedimento normatizado. As medições são feitas enquanto se varia a vazão desde o fechamento (vazão zero), até o máximo. A potência absorvida pela máquina é determinada a partir de um motor calibrado ou calculada a partir da velocidade e do torque medidos. As características calculadas são plotadas nas unidades desejadas, ou adimensionalmente. Se apropriado, curvas suaves e ajustadas podem ser passadas pelos pontos plotados; ou então curvas de ajustagem podem ser aplicadas aos resultados. A Figura 5 mostra um exemplo de curva característica de bomba e a Figura 6 um exemplo de curva característica de ventiladores.

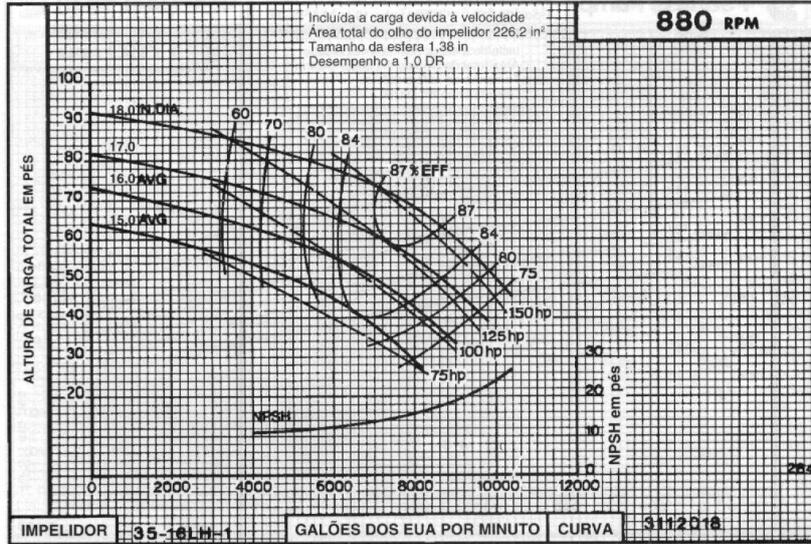


Figura 5 - Curva de desempenho para a bomba Perless 16AE183 a 880 RPM.

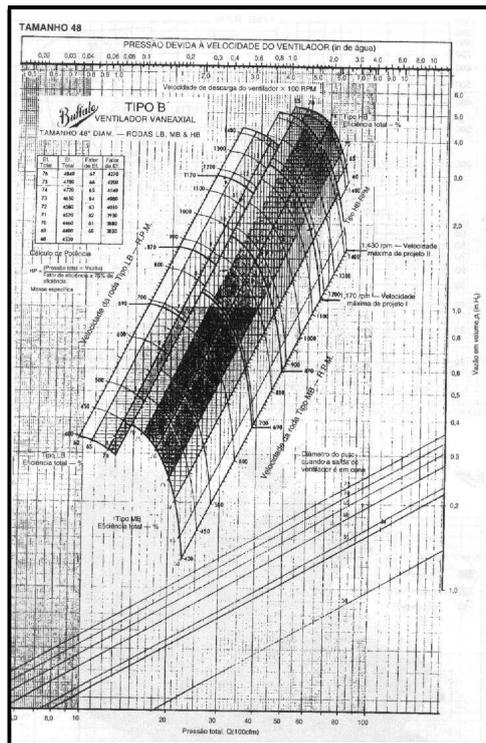


Figura 6 - Curva de desempenho para um ventilador da empresa Bufallo.

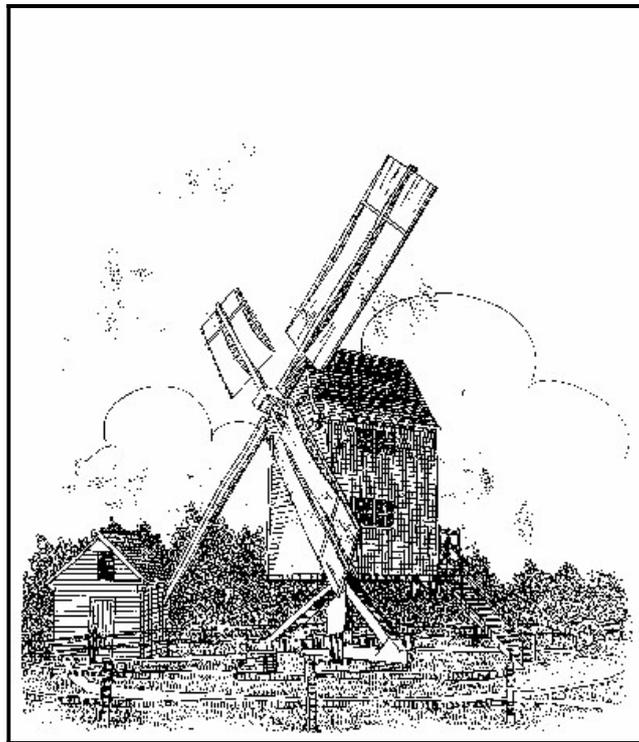
Os ventiladores são projetados para trabalharem com ar e vapor. O seu tamanho varia desde o ventilador de refrigeração de um equipamento eletrônico, que move um metro cúbico de ar por hora e exige alguns Watts de potência, a uma máquina de ventilação de uma mina, que move milhares de metros cúbicos de ar por minuto, e necessita de centenas

de Kilowatts de potência. Os ventiladores são produzidos em variedades similares às bombas: podem ser de fluxo radial ou axial. Como as bombas, a forma da curva característica depende do tipo de ventilador. As curvas características podem ser usadas na escolha de ventiladores para resolverem alguns dos problemas de seleção e projeto para esse tipo de máquina.

O aumento de pressão produzido por ventiladores é diversas ordens de magnitude inferior ao provocado por bombas. Uma outra diferença entre essas duas máquinas é que a medição de vazão é mais difícil para gases e vapores que para líquidos. Não há um equivalente ao método de medição "balde/cronômetro" que se pode empregar em se tratando de líquidos. Conseqüentemente, os testes de ventiladores exigem instalações e procedimentos especiais. Como o aumento de pressão causado por um ventilador é pequeno, é usualmente impraticável medir a vazão com um dispositivo de restrição de fluxo, como uma placa de orifício, bocal medidor ou venturi. Nestes casos, pode ser necessário utilizar um ventilador auxiliar, para desenvolver um aumento de pressão suficiente, de forma a permitir a medição da vazão com precisão aceitável.

### 2.3 - Máquinas movidas pelo vento

Os moinhos de vento ou, mais adequadamente, as turbinas a vento, têm sido usados por séculos para captar a potência dos ventos naturais. Dois exemplos conhecidos são mostrados nas Figuras 7 e 8.



**Figura 7** - Moinho de vento tradicional holandês.

Os moinhos de vento holandeses giravam lentamente, de modo que a potência podia ser usada para acionar rodas de pedras que moíam grãos; daí o nome "moinho de vento". Eles evoluíram para grandes estruturas; o tamanho máximo era limitado pela tecnologia dos materiais da época. Fox (1995) relata que com base em testes de laboratório com modelos, um moinho de vento tradicional holandês, com 26 metros de diâmetro, produzia 41 kW com um vento de 36 km/h, a uma velocidade angular de 20 RPM.

Os moinhos de vento americanos de pás múltiplas (Figura 8) eram encontrados em muitas fazendas entre 1850 e 1950. Eles realizavam valioso serviço no acionamento de bombas d'água antes da eletrificação rural.



**Figura 8** - Moinho de vento das fazendas americanas.

A ênfase recente em produtos renováveis tem reavivado o interesse no projeto e otimização de moinhos de vento. Configurações de turbinas de vento de eixo horizontal (HAWT) e de eixo vertical (VAWT) têm sido estudadas profusamente. A maioria dos projetos HAWT apresenta hélices com 2 ou 3 pás girando em alta velocidade. O grande e moderno HAWT mostrado na Figura 9 é capaz de produzir potência em qualquer vento superior a uma ligeira brisa.



**Figura 9** - Turbinas de vento de eixo horizontal.

#### **2.4 - Efeito chaminé**

Segundo Kittas et al, (1996), quando se considera um campo não uniforme de temperaturas no sistema de interesse, caracterizado por uma abertura entre ambas as partes do mesmo; um fluxo mássico de ar ocorrerá entre a partes quente e fria do fluido, até mesmo na ausência de um gradiente de pressão causado por condições externas (vento). Este fluxo é originado pelo gradiente de densidade do fluido no domínio, produzindo forças de empuxo verticais, chamadas de empuxo térmico, "stack effect" ou ainda efeito de chaminé.

No estudo do exaustor eólico, a avaliação da contribuição do efeito chaminé é importante, pois, uma vez quantificada a contribuição da ação da temperatura na vazão mássica de ar e queda de pressão, também pode-se quantificar a ação inercial do exaustor eólico devida à incidência do vento. A corrente de ar promovida pelo exaustor, acrescida da contribuição de vazão mássica devida ao empuxo térmico, representam, juntas, a corrente total de ar que promove a remoção de umidade do produto necessária a secagem.

Macyntire (1990), avaliando sistemas de ventilação do tipo lanternins e janelas de ventilação, estudou sua relação com a circulação de ar em ambientes limitados e com suas vizinhanças. O autor também apresenta um estudo mais detalhado sobre a contribuição do empuxo térmico em sistemas de ventilação, uma vez que a renovação do ar em ambientes também depende da contribuição do chamado "stack effect", o qual provoca o fenômeno de convecção natural devido à diferenças de temperatura. O autor propõe a Equação 01 para descrever a contribuição da vazão volumétrica de ar,  $Q_c$  (ft<sup>3</sup>/min), devido ao empuxo térmico:

$$Q_c = (9,4).A.\sqrt{H.(T_i - T_e)} \quad (01)$$

sendo que o termo A corresponde a área da abertura em ft<sup>2</sup>, o termo H representa a altura entre o extremo mais baixo no ambiente e a altura da abertura,  $T_i$  e  $T_e$  representam as

temperaturas no interior e exterior do ambiente, em °F e o valor de 9,4 é um parâmetro ligado à obstrução da passagem de ar. Vale ressaltar que, para aberturas obstruídas, o autor recomenda o valor de 7,2.

Boulard & Baille (1995), descrevendo a ventilação em estufas para vegetais, estabelecem a Equação 02 para representar a variação de pressão devida à diferença de temperaturas entre um ambiente externo e um interno:

$$\Delta P = \rho \cdot (9,8) \cdot H \cdot \left( \frac{T_i - T_e}{T_i} \right), \quad (02)$$

sendo a variação de pressão  $\Delta P$  é dada em  $N \cdot m^{-1}$  (Pa),  $\rho$ , a densidade do ar, em  $Kg/m^3$ ,  $H$ , a altura da abertura em relação ao solo, em metros,  $T_e$  corresponde a temperatura externa ao sistema em K e  $T_i$  a temperatura interna igualmente em K.

Perry & Chilton (1997) fornecem a equação abaixo para representar a variação teórica de pressão, em  $inH_2O$ , devida à diferença de temperaturas em chaminés,

$$\Delta P_T = (0,2569) \cdot H \cdot P_B \cdot \left( \frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right), \quad (03)$$

sendo  $H$  a altura da chaminé em ft,  $P_B$  representa a pressão barométrica, em  $inHg$ ,  $T_i$  a temperatura interna em °R e  $T_e$ , a temperatura externa, igualmente em °R.

Os mesmos autores fornecem a Equação 04 que representa a correção de pressão devido às perdas por atrito, para os valores obtidos via Equação 03:

$$\Delta P_F = \frac{\mu^2}{2 \cdot g} \cdot \left( \frac{1 + f \cdot L}{D} \right) \cdot \left( \frac{\rho_g}{5,2} \right), \quad (04)$$

na qual  $\Delta P_F$  corresponde a parcela de queda de pressão relacionada às perdas por atrito dada em  $inH_2O$ ,  $\mu$  é a velocidade do ar na saída chaminé, em ft/s,  $\rho_g$  é a densidade média do ar, em  $lb/ft^3$ ,  $g$  representa a aceleração da gravidade em  $ft/s^2$ ,  $f$  representa o fator de atrito encontrado à partir de um gráfico fornecido pelos autores relacionando fator de atrito ao regime de escoamento,  $L$  representa a altura da chaminé, em ft, e o termo  $D$  representa o diâmetro da chaminé, em ft.

Desta forma, o valor real de diferença de pressão através de uma chaminé é expresso por:

$$\Delta P_R = \Delta P_T - \Delta P_F. \quad (05)$$

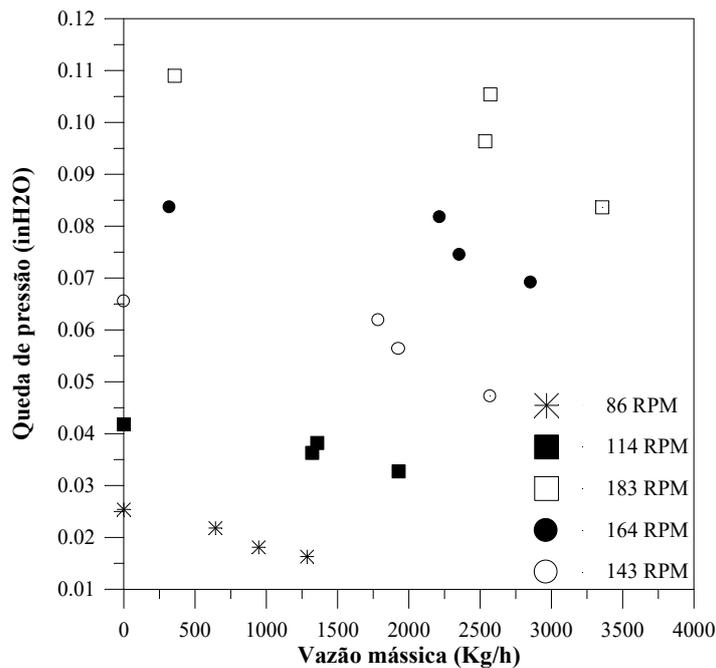
## 2.5 - Caracterização do exaustor eólico

Scheid et al. (2002) caracterizaram um exaustor de 56 cm de altura e com 90 cm de diâmetro da região aletada, no qual foram obtidas as relações vazão mássica-queda de pressão e velocidade do vento-vazão mássica de ar. A influência do acréscimo de temperatura na vazão mássica de ar foi estudada em experimentos utilizando o exaustor com e sem aquecimento.

Na obtenção das vazões volumétricas de ar, foi usada a integração gaussiana da velocidade do ar em três posições internas no cilindro acoplado ao exaustor conforme a Equação 06:

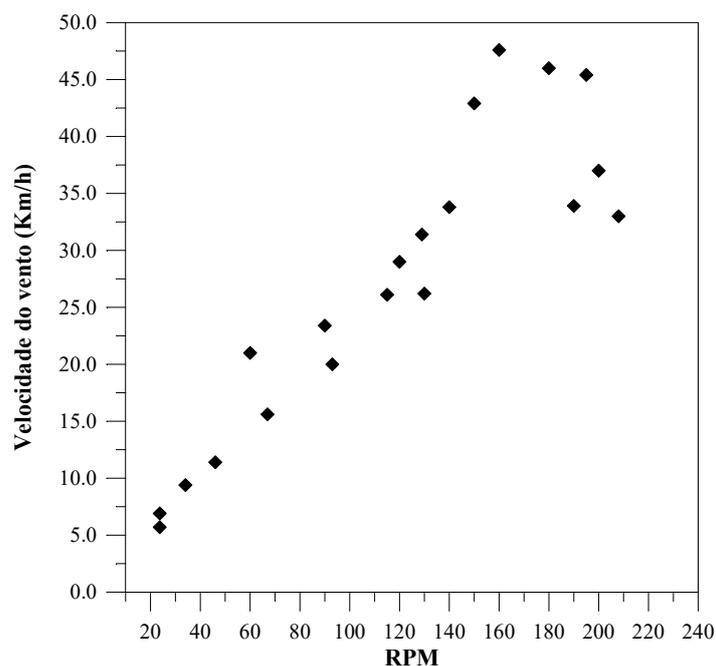
$$Q = 2.\pi.\int_0^R r.V_z(r)dr \quad (06)$$

A Figura 10 mostra as curvas características quedas de pressão-vazões mássicas de ar obtidas nos experimentos de Scheid et al. (2002). Foram utilizadas 86, 114, 183, 143 e 164 RPM. O comportamento é similar ao encontrado em sopradores convencionais.



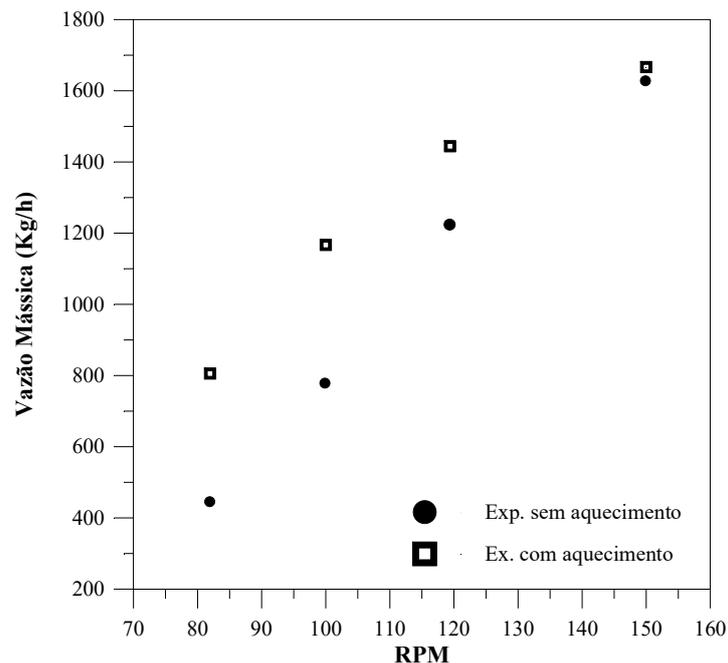
**Figura 10** - Curvas características quedas de pressão-vazões mássicas de ar para o exaustor utilizado por Scheid et al. (2002).

A Figura 11 mostra a curva característica velocidade do vento-rotação obtida pelos autores, nota-se uma dependência linear, dentro da faixa experimental adotada, das velocidades do vento com o número de rotações por minuto do exaustor utilizado.



**Figura 11** - Curva característica velocidade do vento-RPM para o exaustor utilizado por Scheid et al. (2002).

Os resultados obtidos revelaram uma relação linear entre as variáveis plotadas para a curva característica velocidade do vento-vazão mássica de ar e um comportamento típico de máquinas propulsoras de fluido para a curva queda de pressão-vazão mássica. A Figura 12 mostra os experimentos realizados com o intuito de testar a influência da temperatura na vazão mássica de ar, sendo utilizada uma diferença de temperaturas de 14°C entre os experimentos com e sem aquecimento. Este estudo revelou influência da temperatura somente em rotações inferiores a 140 RPM nos quais os valores sofreram acréscimo de vazão nos experimentos com aquecimento. À partir deste valor de rotação os efeitos de temperatura tornam-se imperceptíveis e as vazões mássicas de ar para experimentos com e sem aquecimento se igualam.



**Figura 12** - Estudo da influência de temperatura nos experimentos de Scheid et al. (2002).

## 2.6 - Secagem

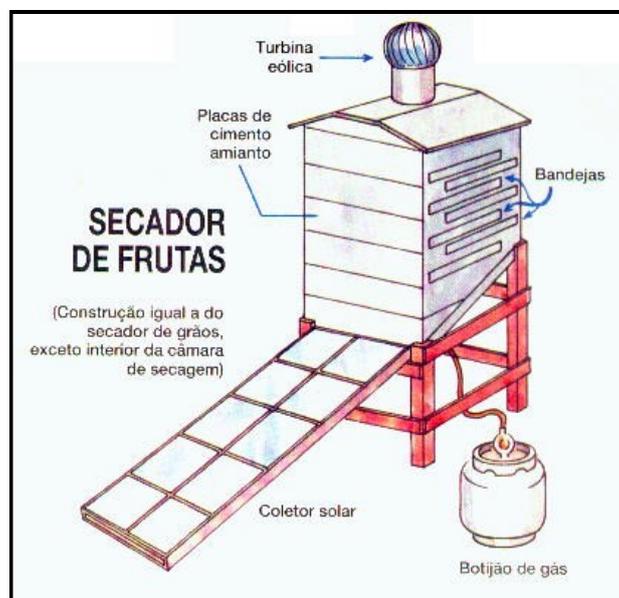
Produtos recém-colhidos do campo podem apresentar um teor de umidade inadequado para serem armazenados e transportados com segurança, necessitando, portanto, serem secados. Esta operação é necessária porque um alto teor de umidade durante o armazenamento é uma das principais causas da perda de qualidade do produto devido à degradação pela incidência de fungos, microorganismos e insetos nocivos. Estes agentes causam o aumento da velocidade de degradação dos produtos reduzindo seu tempo de armazenamento e de transporte. No caso de sementes, é a principal causa da perda do poder germinativo e do vigor.

Diversos parâmetros podem ter influência na operação de secagem. Segundo Sokhansanj et al. (1995), os parâmetros que influenciam significativamente o desempenho do secador são descritos por:

- Características do ar de secagem (temperatura do ar de secagem, umidade e fluxo de ar);
- Variáveis do produto (umidade inicial e final, tamanho e distribuição do produto);
- Variáveis dimensionais (largura, extensão, altura ou diâmetro do secador e configuração do secador).

A Figura 13 mostra um sistema de secagem desenvolvido pelo CTAA – Centro Nacional de Pesquisa de Tecnologia Agroindustrial de Alimentos, da EMBRAPA, que aproveita a energia solar combinada com a energia eólica em um único sistema de secagem. O equipamento foi exibido pela revista Globo Rural, em sua edição de Nº 116, ano 11, na matéria intitulada "O sol a seu serviço". Neste sistema, o ar de secagem é aquecido por meio da queima de gás de cozinha e, também, à partir de um coletor solar auxiliar acoplado a uma câmara de secagem que possui, em seu topo, um exaustor eólico do

tipo cogumelo. Cabe acrescentar que na reportagem não foram apresentados dados qualitativos nem quantitativos que permitam a avaliação do secador proposto.

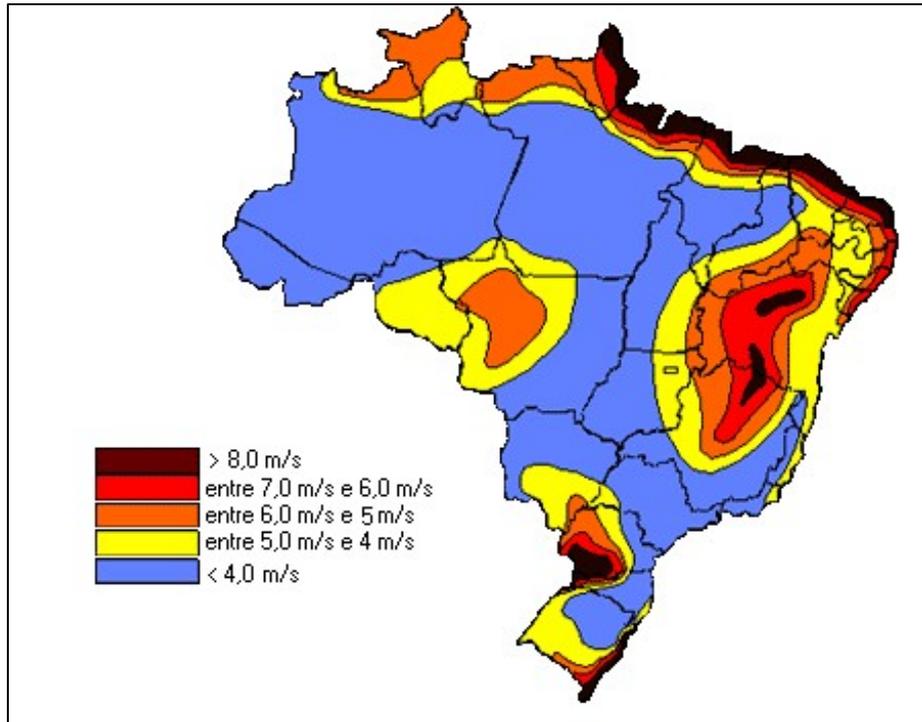


**Figura 13** - Secador de frutas desenvolvido pela EMBRAPA.

Em vista do exposto, a secagem constitui uma forma alternativa de aplicação do exaustor eólico. Seu uso representa uma alternativa econômica para a inserção do pequeno produtor em um mercado de produtos mais valorizados, haja vista o baixo custo de aquisição e implantação do sistema de secagem, dependendo unicamente do potencial eólico da região onde for implantado.

## 2.7 - Potencial eólico

A Figura 14 ilustra o mapeamento do potencial eólico brasileiro efetuado pelo Instituto Brasileiro de Energia Eólica no ano de 1998. O mapa mostra as velocidades do vento para todas as regiões do Brasil e que o potencial eólico do estado do Rio de Janeiro possui velocidades abaixo de 5,0 m/s, enquanto que, nas regiões localizadas ao norte e ao extremo sul do país, as velocidades são superiores.



**Figura 14** - Mapa do potencial eólico brasileiro efetuado em 1998.

### 3 - MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 - O exaustor eólico

As dimensões do exaustor eólico tipo cogumelo, utilizado neste trabalho e fabricado pela indústria LUFTMÁXI, podem ser verificadas na Figura 15. Este exaustor tem uma configuração comum, sendo o modelo mais empregado nacionalmente na exaustão de ambientes. Suas dimensões são maiores que o empregado por Scheid et al, (2002) buscando, desta forma, a obtenção de uma maior faixa de operação.

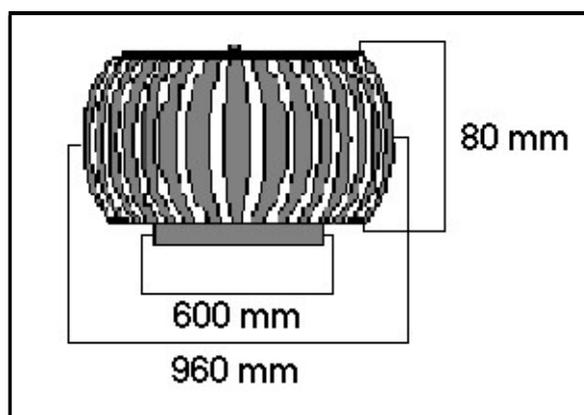
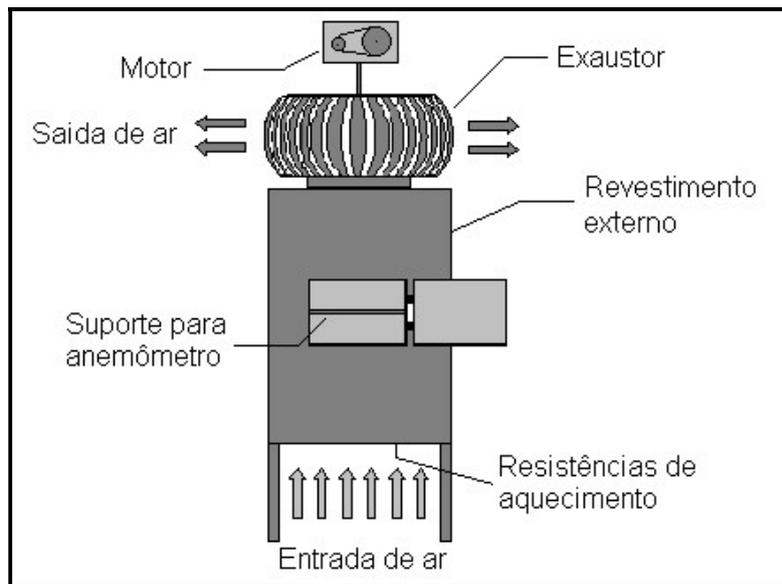


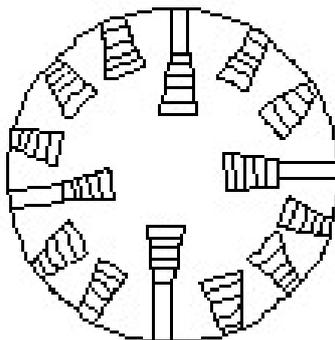
Figura 15 - Dimensões do exaustor.

#### 3.2 - A unidade experimental

Para a caracterização do exaustor eólico utilizado foi montado o esquema experimental indicado na Figura 16, composto do exaustor eólico acoplado a um cilindro metálico de 1,7 metros de altura e 0,65 metros de diâmetro interno, revestido externamente por uma camada de isopor de 1 cm de espessura. O silo é dotado de uma janela na sua região intermediária. Na mesma região do silo, internamente, encontra-se um suporte removível para fixação do anemômetro necessário às medições de velocidade. Ao eixo do exaustor é conectado a um motor de rotação variável, que permite simular, em situações controladas, a ação do vento. A Figura 17 ilustra a conformação do conjunto de resistências usadas na unidade experimental para o estudo do efeito térmico e na secagem.



**Figura 16** - Unidade experimental.



**Figura 17** - Resistências de aquecimento.

### 3.3 - Equipamentos de medida

Foram utilizados os seguintes equipamentos: fototacômetro digital, usado no ajuste e obtenção do número de rotações do exaustor; anemômetro digital de hélice, usado na coleta das velocidades do ar no interior do silo para o cálculo da vazão mássica de ar; micromanômetro digital, usado na obtenção dos valores de quedas de pressão para o estudo do efeito de temperatura; termohigrômetro digital, utilizado na obtenção dos dados de temperatura e umidade relativas internas (secagem e estudo do efeito da temperatura) e anemômetro digital de copo, utilizado na obtenção das velocidades do vento na região de Seropédica (RJ). As especificações técnicas destes equipamentos encontram-se na Tabela 2.

**Tabela 2** - Equipamentos de medida.

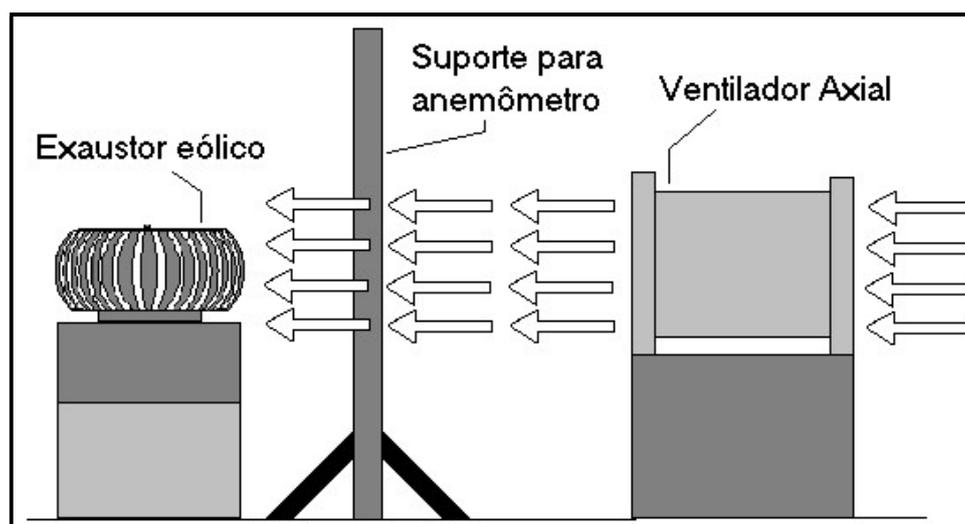
<b>Unidade Medida</b>	<b>Equipamento</b>
Velocidade do ar	Anemômetro digital Minipa MDA-10 (São Paulo)
Rotação	Fototacômetro digital Minipa MDTA-2238 (São Paulo)
Temperatura e umidade	Termo-higrometro digital HANNA HI 8563
Queda de pressão	Micromanômetro digital Cole-parmer MA20021 (USA)
Velocidade do Vento	Anemômetro digital Minipa MDA-12 (São Paulo)

### 3.4 - Obtenção das curvas características

As curvas características têm por função relacionar variáveis operacionais que envolvem o funcionamento do exaustor eólico, com o objetivo de se avaliar suas potencialidades na aplicação em secadores. As variáveis importantes, neste caso, são a vazão mássica de ar impelida pelo exaustor, o número de rotações do exaustor eólico, a velocidade do vento incidente no mesmo e a diferença de pressão entre o interior e o exterior do equipamento. Vale ressaltar que, na obtenção das curvas características, as resistências de aquecimento da unidade experimental foram retiradas, impedindo medições falsas (mais baixas) de velocidade do ar impelido pelo exaustor.

#### 3.4.1 - Levantamento da curva velocidade do vento-rotação

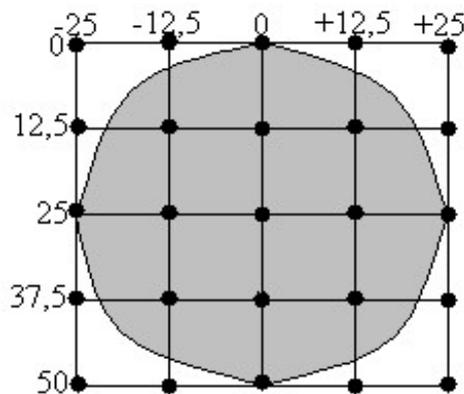
Para tornar possível a obtenção da curva velocidade do vento-rotação, foi montado o aparato experimental indicado na Figura 18, que consistia de um ventilador axial de 2 HP de potência e 65 cm de diâmetro de pás, responsável pela simulação da ação do vento, e um suporte para o anemômetro com a finalidade de medir a velocidade do ar em diversos pontos ao longo dos eixos vertical e horizontal em posições frontais ao ventilador axial.



**Figura 18** - Aparato experimental montado para obtenção da curva de caracterização velocidade do vento-RPM.

No esquema da Figura 18, sem a presença do exaustor, o ventilador era acionado e o suporte do anemômetro era deslocado da sua proximidade de 20 em 20 cm, à partir de um distanciamento inicial de 60 cm, até a distância de 280 cm. Para cada valor de distanciamento do ventilador axial, as velocidades foram coletadas em 20 pontos (ver Figura 19) no plano frontal de impacto do ar, logo após o ventilador axial. Para cada ponto de impacto, foram registradas 8 repetições dos valores de velocidade que originaram, então, valores médios. Os valores médios de todas as coordenadas deram origem a um valor final igualmente médio correspondente à velocidade do vento nesta distância do ventilador.

Em seguida, os valores de rotação do exaustor, foram registrados, para cada distanciamento, posicionando-o em frente ao ventilador, na mesma posição adotada anteriormente para o suporte do anemômetro, compondo, após a medição de velocidade um total de 12 rotações distintas.



**Figura 19** - Conformação frontal dos pontos de medição de velocidade adotada para promover a simulação da ação do vento, tendo como referência o ventilador axial (em tom escuro).

### 3.4.2 - Levantamento da curva vazão mássica de ar-rotação

Para o levantamento da curva vazão mássica de ar-rotação foi utilizada a unidade experimental mostrada na Figura 16, desprovida das resistências de aquecimento. Foram utilizados, com o ajuste do motor de rotação controlada, valores de 60, 80, 100, 120 e 140 RPM para o exaustor. Para a obtenção das vazões volumétricas de ar nas rotações citadas, foram coletadas velocidades internas da corrente de ar obtidas ao longo do diâmetro do silo numa altura mediana do mesmo. As posições de coleta das velocidades foram de 6,8 cm, 38,4 cm e 59,2 cm à partir da borda do silo. Sendo utilizado o anemômetro digital de hélice. Uma vez obtidas, a vazão volumétrica de ar foi calculada adotando-se o mesmo procedimento de Scheid et al. (2002), sendo usada uma quadratura gaussiana de três pontos de acordo com a Equação 07.

$$Q = 2\pi \int_0^R r V_z(r) dr = 2\pi R^2 [0,070V_1 + 0,229V_2 + 0,201V_3] \quad (07)$$

sendo  $V_1$ ,  $V_2$  e  $V_3$  as velocidades do ar nas posições do interior do silo de 6,8 cm, 38,4 cm e 59,2 cm respectivamente a partir das bordas. Estes valores de vazão volumétrica, com auxílio das respectivas densidades do ar, originaram valores de vazão mássica para as diferentes rotações do exaustor. Os valores de rotação do exaustor foram obtidos por meio do fototacômetro digital. Vale ressaltar que estes dados foram obtidos sem a presença das resistências na base do silo, visto que estas representavam uma obstrução ao fluxo de ar.

### 3.4.3 - Levantamento das curvas vazões mássicas de ar-quedas de pressão

Para a obtenção das curvas relacionando as vazões mássicas de ar com as respectivas quedas de pressão, foi necessário proporcionar perdas de carga variadas no sistema mostrado na Figura 16, sem as resistências de aquecimento. Para isso, foram posicionadas telas comerciais de diferentes áreas de abertura na parte inferior do equipamento (região inferior do silo metálico). As telas usadas apresentavam  $1 \text{ mm}^2$ ,  $3 \text{ mm}^2$ ,  $17,5 \text{ mm}^2$  e  $25 \text{ mm}^2$  de área de abertura, sendo efetuadas, para cada tela posicionada na abertura do silo metálico, medições de vazão mássica e queda de pressão para rotações no exaustor de 60, 80, 100 e 120 RPM. Desta forma foi possível construir as curvas características para todas as rotações adotadas.

### 3.5 - Avaliação do efeito chaminé

Com a finalidade de avaliar a contribuição do efeito chaminé, foram efetuados experimentos com e sem aquecimento na unidade experimental, mostrada na Figura 16, registrando-se, simultaneamente, valores de quedas de pressão e vazões mássicas para cada caso. As rotações adotadas para o exaustor foram de 60, 70, 80, 100, 110 e 120 RPM. Nos experimentos com aquecimento, as variações de temperatura entre o ambiente e o interior da unidade de secagem foram de  $10^\circ\text{C}$ , para a maior rotação, até  $17^\circ\text{C}$ , para a menor, como pode ser visto na Tabela 3.

**Tabela 3** - Variações de temperatura entre o ambiente externo e a unidade experimental durante os experimentos com aquecimento.

RPM	$\Delta T(^{\circ}\text{C})$
60	17,4
70	15,1
80	14,3
90	13,0
100	12,2
110	11,5
120	9,9

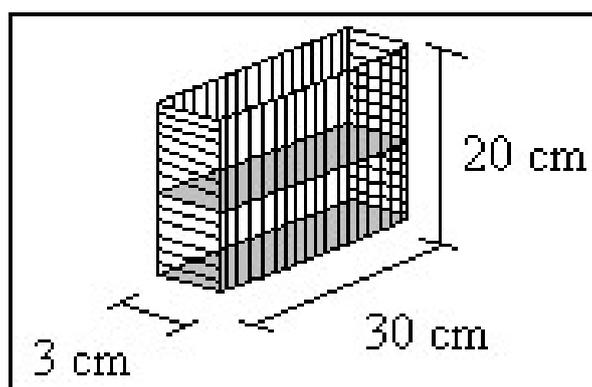
Os experimentos com aquecimento consistiam no ajuste da rotação desejada do exaustor por meio do motor de rotação controlada e, em seguida, eram acionadas as resistências de aquecimento. Após 30 minutos, era iniciada a coleta dos valores de velocidade da corrente de ar e das diferenças de pressão. Para os experimentos sem aquecimento, o procedimento foi o mesmo, sem o acionamento das resistências. Foram

testadas as equações de Boulard & Baille (1995), Perry & Chilton (1997) e Macyntire (1990). Os dois primeiros descrevendo contribuições de queda de pressão devido às diferenças de temperatura, e o terceiro descrevendo o acréscimo de vazão volumétrica de ar devido, igualmente, ao acréscimo de temperatura na corrente de ar.

### 3.6 - Secagem

A unidade experimental foi utilizada, com as resistências de aquecimento acopladas em sua base, para a realização de testes de secagem sob rotação controlada. Foram utilizados capim-limão (*Cymbopogon citratus*), abacaxi (*Ananas comosus L. Merrill*) e sementes de tomate (*Lycopersicon esculentum*) como produtos destinados à secagem em rotações do exaustor de 70 RPM e 100 RPM. Na rotação de 100 RPM, foram utilizadas todas as resistências de aquecimento, enquanto que nos experimentos a 70 RPM foram subtraídas estrategicamente 3 resistências, mantendo as temperaturas médias semelhantes em ambos os experimentos. De modo a permitir a análise do efeito da vazão mássica de ar nos experimentos de secagem.

Para as secagens de capim limão e abacaxi utilizou-se uma célula de secagem vertical formada por uma estrutura rígida envolvida por uma tela metálica com as dimensões ilustradas na Figura 20.



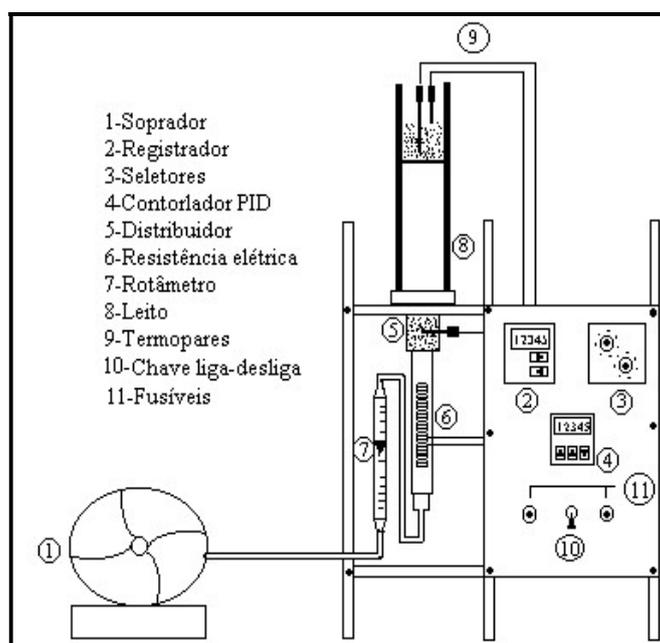
**Figura 20** - Célula de secagem vertical.

No caso da secagem de sementes de tomate, utilizou-se uma bandeja de tela com dimensões de 20 cm de largura por 30 cm de comprimento, capaz de acolher as amostras sem perda de material, sendo que a célula vertical (Figura 20) e a bandeja de tela foram posicionadas em uma região intermediária do interior do silo metálico durante os experimentos. Em todos os experimentos, o equipamento era pré-aquecido durante 30 minutos até a estabilidade de temperatura, quando era iniciada a secagem. A umidade do sólido foi obtida a partir da pesagem da amostra em tempos pré-determinados e a temperatura do sistema era monitorada através de termo-higrômetro posicionado no centro do silo em altura intermediária. Os experimentos se estenderam por aproximadamente 9 horas.

Para comparação dos ensaios de secagem, foram efetuados experimentos adicionais em estufa e utilizando uma unidade tradicional de secagem em leito fixo. A exceção foram as sementes de tomate, que não foram secas em leito fixo. Porque a velocidade adotada nos

experimentos causava a fluidização do produto, descaracterizando o leito como fixo. Realizaram-se experimentos sob as mesmas condições de temperatura e velocidade superficial do ar, sendo que na secagem em estufa, a velocidade do ar não foi quantificada.

A Figura 21 mostra a unidade experimental usada para a secagem em leito fixo convencional. A mesma foi utilizada por Silva et al. (2004) no estudo da secagem de sementes de hortaliças, sendo composta de um soprador de 2 HP acoplado a um rotâmetro na sua alimentação, resistências elétricas de aquecimento logo em seguida e ao final se posicionava o leito apresentando 0,3 m de altura e 0,1 m de diâmetro. O. A temperatura foi monitorada a partir de termopares dispostos axialmente no leito e seu controle da temperatura foi feito por meio de controlador PID acoplado às resistências de aquecimento.



**Figura 21** - Unidade tradicional de secagem em leito fixo.

### 3.6.1 - Secagem de capim limão (*Cymbopogon citratus*)

O capim-limão possui seu valor comercial. Seus óleos essenciais são de estrutura complexa devido a presença de diversas substâncias. Seu valor comercial reside na extração de óleos aromatizantes para a indústria.

Foram utilizadas amostras de capim-limão colhidas no dia anterior aos experimentos no Jardim Botânico da UFRRJ, com comprimento de cerca de 20 cm e cortadas em uma região mediana das folhas. As amostras foram divididas igualmente entre os dois compartimentos da célula de secagem vertical.

### 3.6.2 - Secagem de abacaxi (*Ananas comosus L. Merril*)

Para cada experimento foram utilizadas 3 fatias de abacaxi com cerca de 0,5 cm de espessura e 9 cm de diâmetro cada uma, cortadas no mesmo dia do experimento. A célula de secagem foi modificada retirando-se a divisão interna de modo a acolher as amostras que

foram penduradas verticalmente no seu interior com auxílio de arame. Vale ressaltar que sob determinadas condições de temperatura e vazão de ar, o abacaxi apresenta taxas constantes de secagem.

### **3.6.3 - Secagem de sementes de tomate (*Lycopersicum esculentum*)**

A umidade inicial adotada nos experimentos foi de 0,3 gH<sub>2</sub>O/g sólido seco, tendo em vista os valores encontrados usualmente em sementes deste tipo. Esta umidade foi atingida a partir de umidificação prévia no dia anterior ao do experimento através de aspersão de água sobre as sementes, seguido de homogeneização no mesmo recipiente em que foi feita a aspersão. As sementes foram espalhadas homogeneamente na tela utilizada para a secagem de forma a impedir sua aglomeração, propiciando um maior contato da corrente de ar de secagem.

### **3.7 - Obtenção do potencial eólico da região**

Com o objetivo de avaliar a aplicação da secagem eólica na região de Seropédica (RJ) foram efetuadas medições diárias da velocidade do vento que se estenderam durante 12 meses. As medições consistiam de verificações diárias, todas as manhãs, sendo obtidos 10 pontos experimentais medidos em seqüência a cada minuto, num total de 10 minutos de coleta por dia. As medidas foram realizadas nas imediações do laboratório de Sistemas Particulados/DEQ/IT, evitando-se a proximidade de árvores ou obstruções ao movimento do vento. Estes valores de velocidade originaram valores diários médios que constituíram os valores da velocidade do vento. Vale ressaltar que medições de velocidade do vento na região foram efetuados pela PESAGRO-EMBRAPA até o ano de 1994. Eram necessárias medições mais recentes que constituíram as medições obtidas, com a intenção de confirmar a veracidade destes dados.

## 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 - Curvas características do exaustor

#### 4.1.1 - Curva vazão mássica de ar-número de rotações

Com o objetivo de verificar o comportamento da vazão mássica de ar movimentada pelo exaustor eólico em relação ao número de rotações por minuto foi construída esta curva característica, que, juntamente com a curva velocidade do vento-número de rotações do exaustor, deram origem à curva vazão mássica de ar-velocidade do vento.

Na figura 22 são apresentados os dados experimentais que mostram uma dependência linear da vazão mássica de ar impelida pelo exaustor com seu número de rotações. Esse comportamento se estendeu em toda a faixa operacional aplicada que foi de 60 até 140 RPM. Acredita-se que esse comportamento linear não se mantenha indefinidamente com o aumento da rotação do exaustor, mas que tenda a um valor máximo para a vazão mássica de ar. Os resultados obtidos foram similares qualitativamente aos encontrados por Scheid et al. (2002).

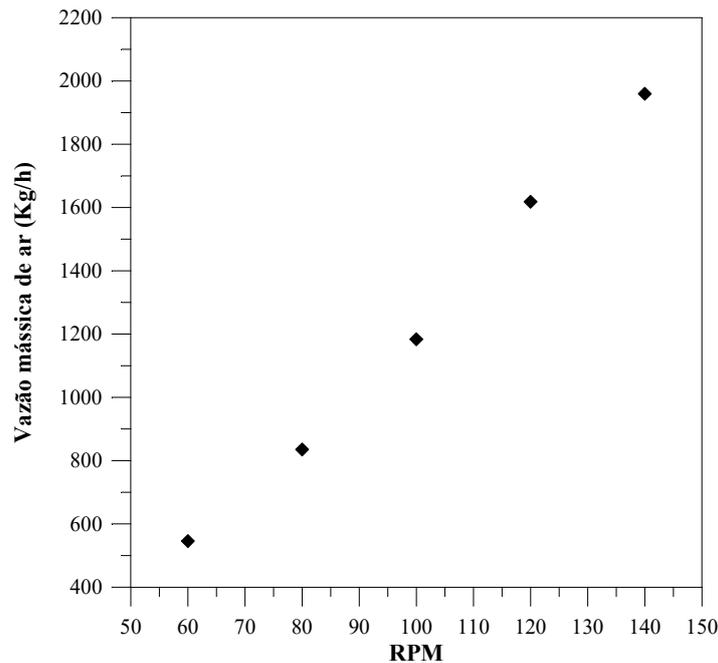


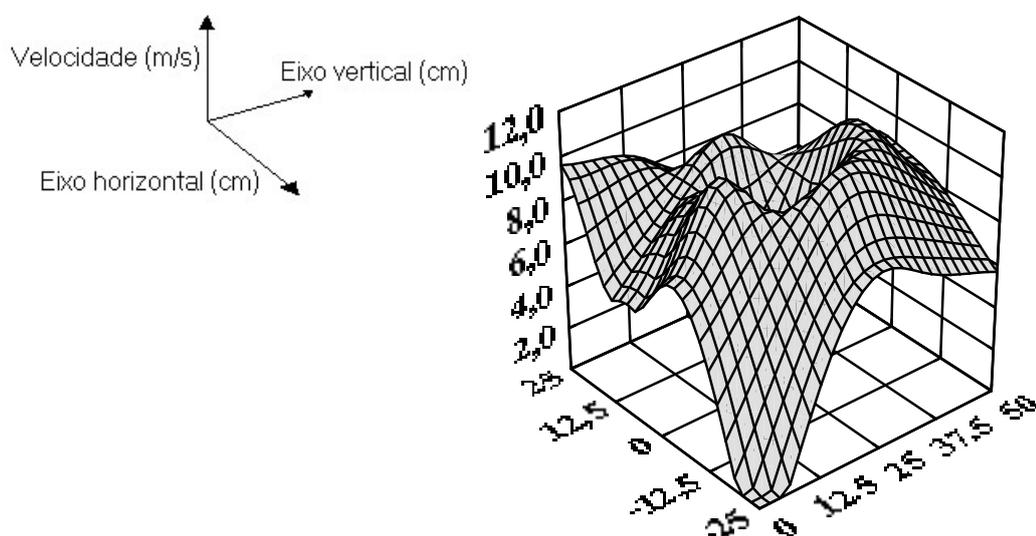
Figura 22 - Curva característica vazão mássica de ar-RPM.

#### 4.1.2 - Curva velocidade do vento-número de rotações

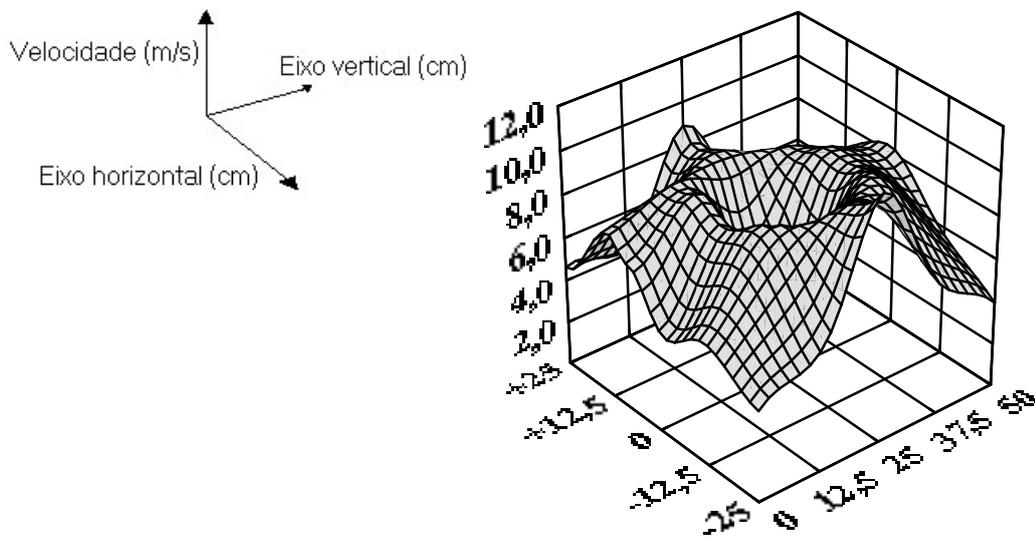
Esta curva característica visa estabelecer o comportamento da velocidade do vento incidente no exaustor eólico com o seu número de rotações por minuto. Esta curva

juntamente com a anterior, vazão mássica de ar-número de rotações, origina a curva vazão mássica de ar-velocidade do vento.

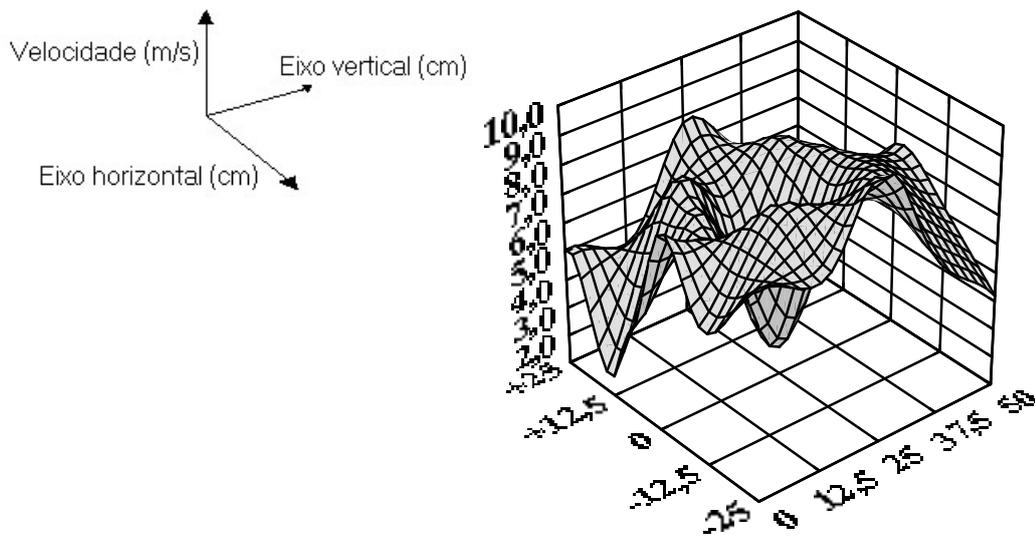
Com o intuito de verificar o comportamento do perfil de velocidades com o distanciamento do suporte para o anemômetro do ventilador axial, foram plotados gráficos detalhando as velocidades de ar incidente para as diferentes coordenadas de coleta de dados, a cada distanciamento. Estas coordenadas de coleta formam o perfil de impacto do vento no exaustor e são, ao todo, 20 pontos nos gráficos localizados por meio dos eixos horizontais inferiores. Estes gráficos, Figuras 23 à 34, ilustram as velocidades obtidas para diferentes perfis de impacto, nas coordenadas adotadas nos experimentos, sendo os valores de velocidade representados graficamente pelo eixos verticais e em metros por segundo. A partir destas figuras, pode-se observar velocidades do vento menores ao centro do plano, tendo em vista que o ventilador axial possui uma região central desprovida da ação dos impelidores. Este fato faz com que as velocidades médias tenham valores inferiores nesta região. Nota-se, também, uma maior homogeneidade dos valores de velocidade do vento com o distanciamento do suporte para anemômetro do ventilador axial.



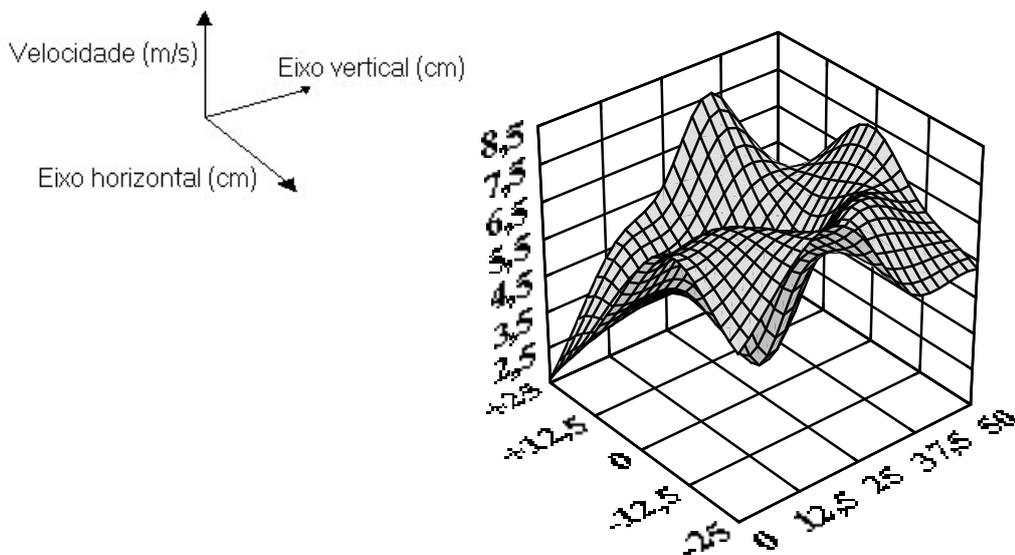
**Figura 23** - Gráfico do perfil de impacto da velocidade do vento para um distanciamento do suporte para anemômetro de 60 cm.



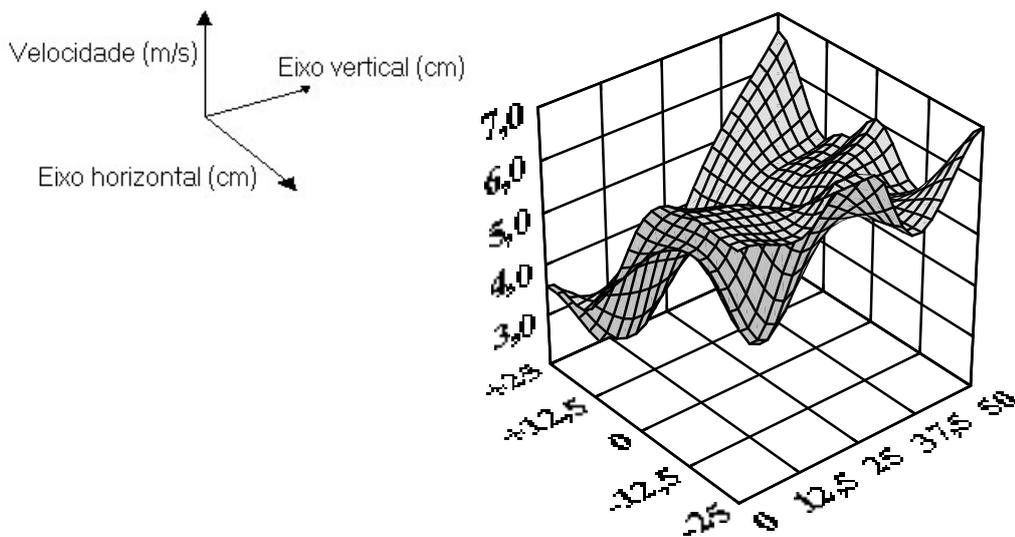
**Figura 24** - Gráfico do perfil de impacto da velocidade do vento para um distanciamento do suporte para anemômetro de 80 cm.



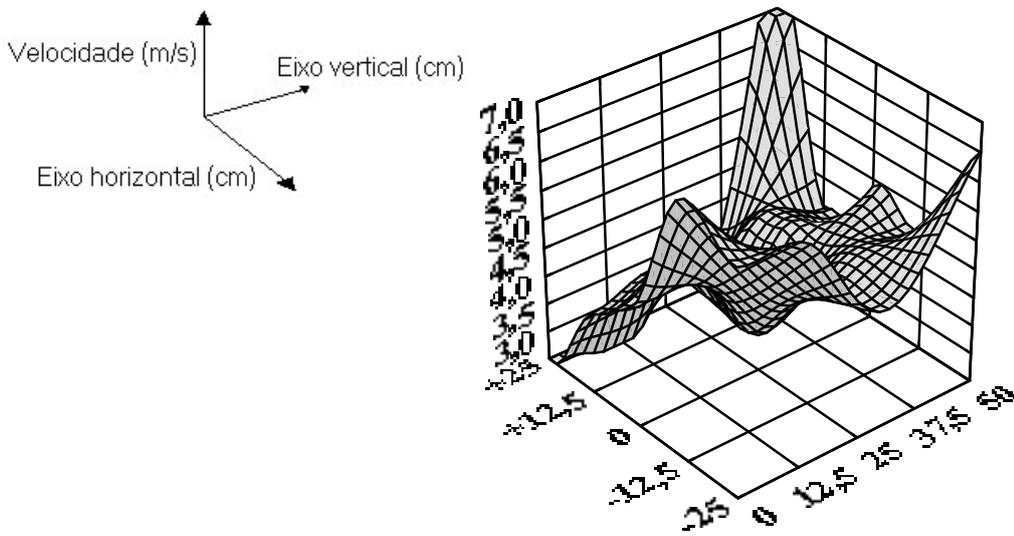
**Figura 25** - Gráfico do perfil de impacto da velocidade do vento para um distanciamento do suporte para anemômetro de 100 cm.



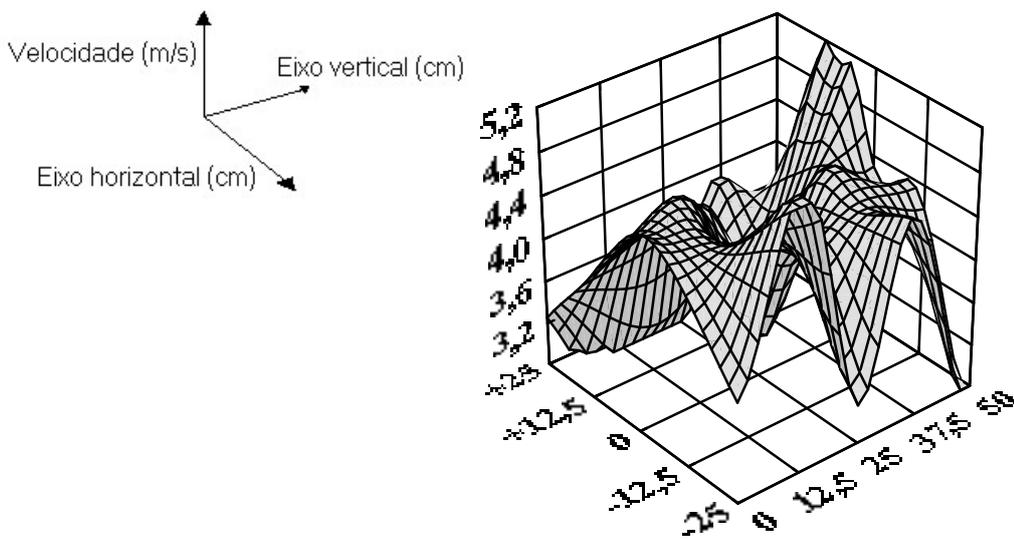
**Figura 26** - Gráfico do perfil de impacto da velocidade do vento para um distanciamento do suporte para anemômetro de 120 cm.



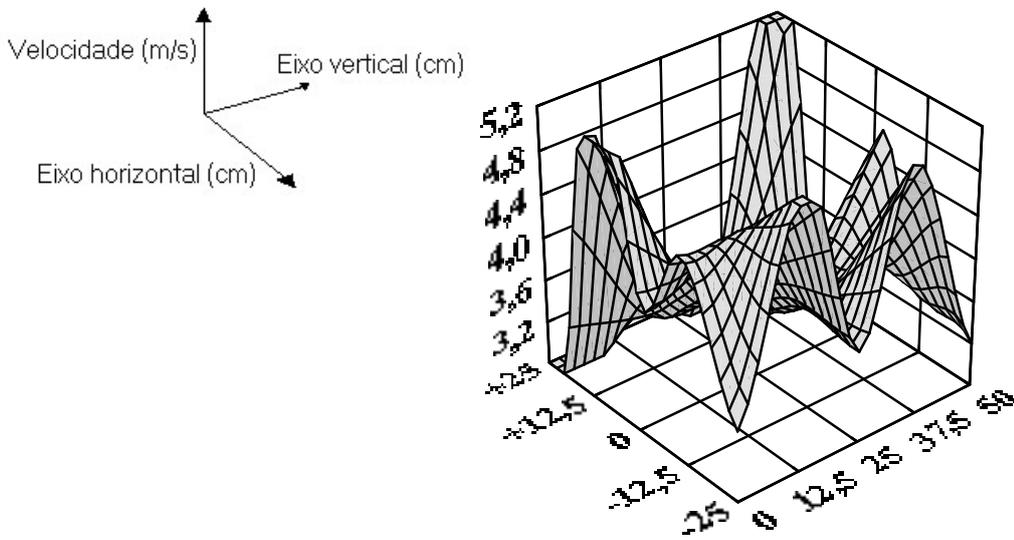
**Figura 27** - Gráfico do perfil de impacto da velocidade do vento para um distanciamento do suporte para anemômetro de 140 cm.



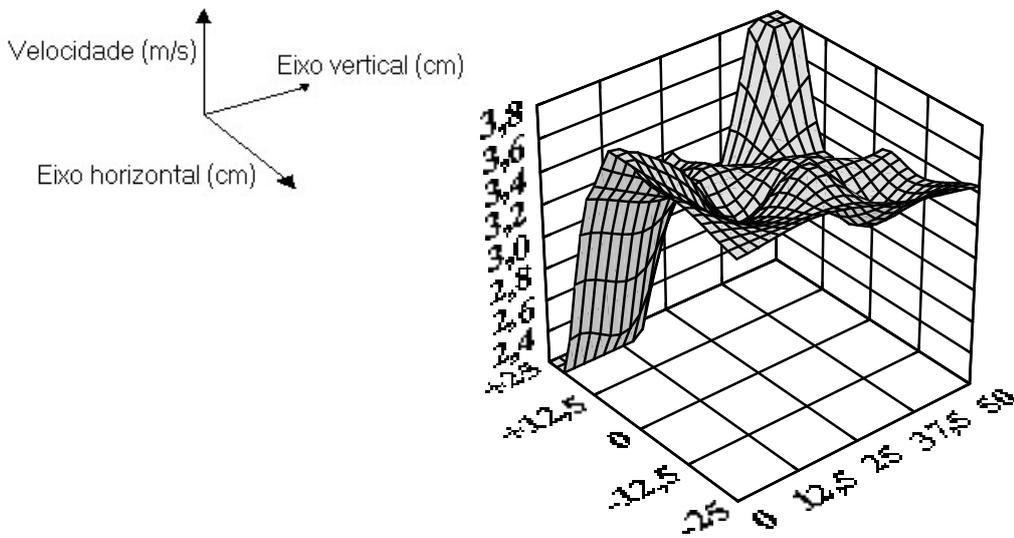
**Figura 28** - Gráfico do perfil de impacto da velocidade do vento para um distanciamento do suporte para anemômetro de 160 cm.



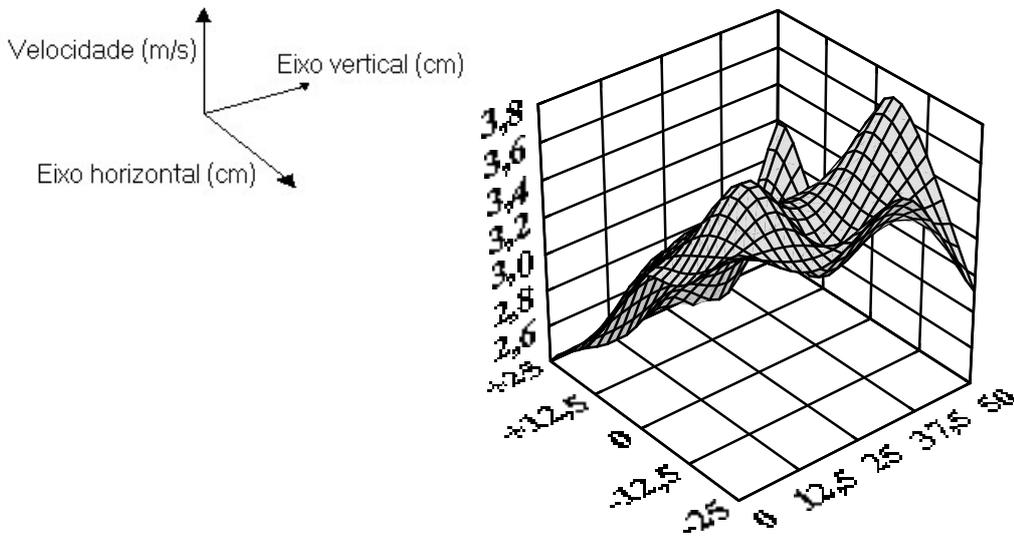
**Figura 29** - Gráfico do perfil de impacto da velocidade do vento para um distanciamento do suporte para anemômetro de 180 cm.



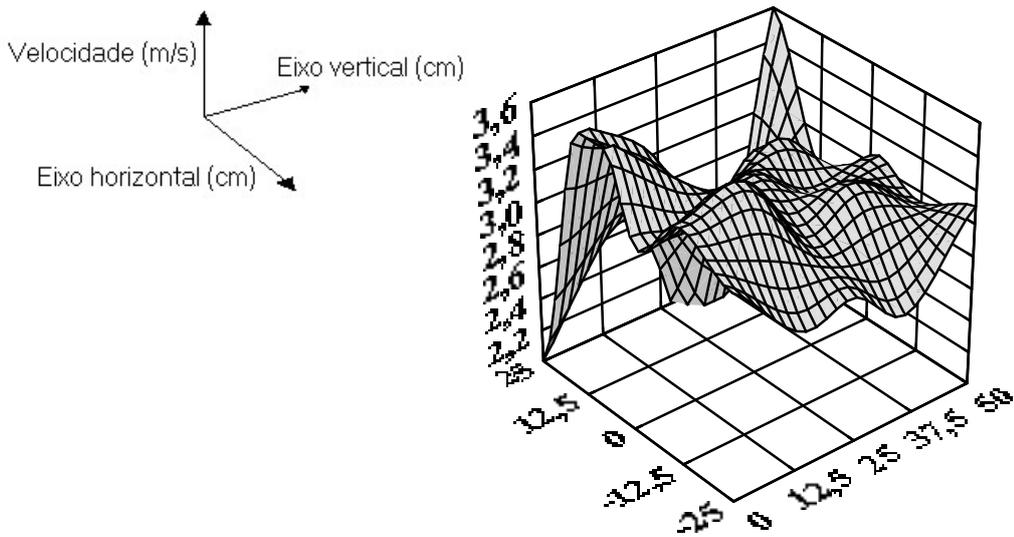
**Figura 30** - Gráfico do perfil de impacto da velocidade do vento para um distanciamento do suporte para anemômetro de 200 cm.



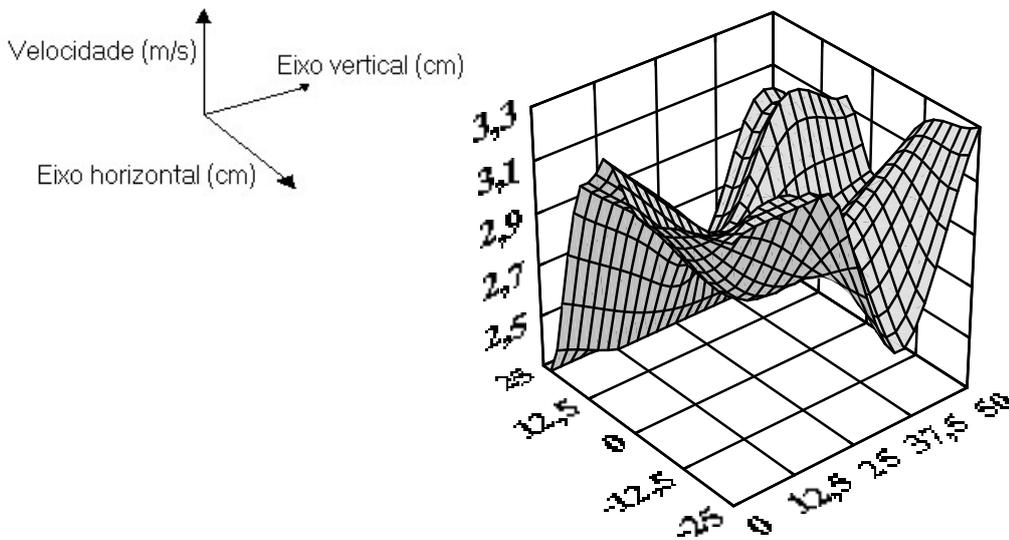
**Figura 31** - Gráfico do perfil de impacto da velocidade do vento para um distanciamento do suporte para anemômetro de 220 cm.



**Figura 32** - Gráfico do perfil de impacto da velocidade do vento para um distanciamento do suporte para anemômetro de 240 cm.



**Figura 33** - Gráfico do perfil de impacto da velocidade do vento para um distanciamento do suporte para anemômetro de 260 cm.



**Figura 34** - Gráfico do perfil de impacto da velocidade do vento para um distanciamento do suporte para anemômetro de 280 cm.

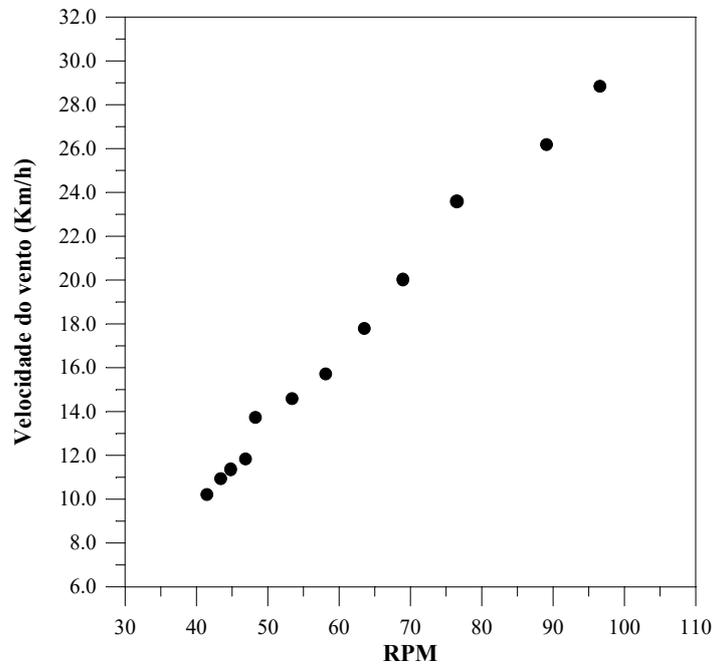
A partir dos dados de velocidade apresentados nas Figuras 23 a 34, calculou-se a velocidade média para cada perfil de velocidade obtido, sendo os resultados apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4** - Dados experimentais relacionando número de rotações e velocidades médias do vento incidente no exaustor.

<b>Distância do ventilador (cm)</b>	<b>RPM</b>	<b>Velocidades médias (Km/h)</b>
60	96,6	28,8
80	89,1	26,3
100	76,6	23,4
120	69,0	19,8
140	63,6	17,6
160	58,2	15,8
180	53,4	14,4
200	48,3	13,7
220	46,9	11,9
240	44,9	11,2
260	43,5	10,8
280	41,6	10,1

A Figura 35 apresenta a curva característica velocidade do vento-rotação construída com base nos dados da Tabela 5, mostrando uma dependência linear do número de rotações com a velocidade do vento, que se estendeu de 10 km/h até aproximadamente 29 km/h e uma faixa de rotações que se estendeu de 41,6 até 96,6 RPM. Dentro da faixa operacional

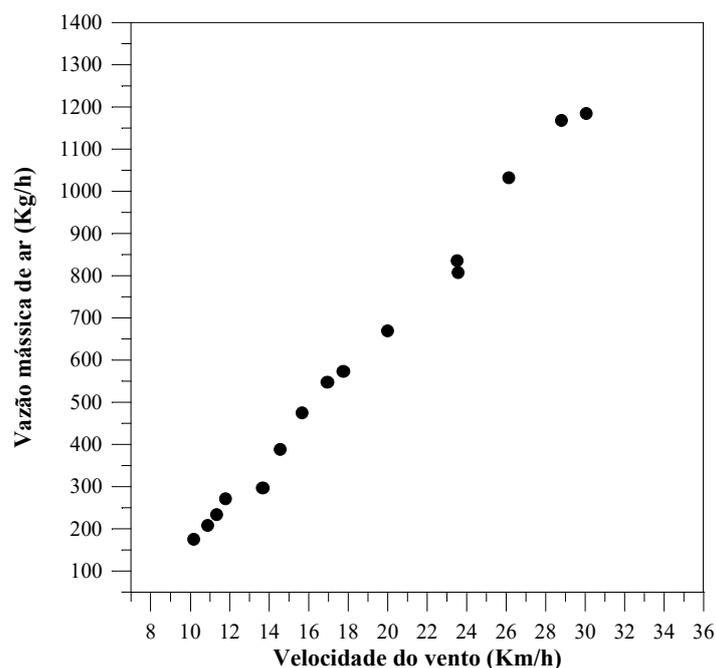
adotada, o comportamento é nitidamente linear e semelhante ao obtido por Scheid et al. (2002). Acredita-se que o comportamento observado não se prolongue indefinidamente, ou seja, o exaustor deve atingir um valor máximo de rotações para valores iguais ou acima de um valor limite de velocidade do vento.



**Figura 35** - Curva característica velocidade do vento-RPM.

#### 4.1.3 - Curva vazão mássica de ar-velocidade do vento

Os dados experimentais relacionando velocidade do vento-rotação e vazão mássica de ar-rotação permitem relacionar a vazão mássica de ar com a velocidade do vento incidente no exaustor. Esta curva, juntamente com a curva vazão mássica de ar-queda de pressão, constituem as mais importantes curvas características do exaustor. Esta relação é ilustrada por meio da Figura 36 e da Tabela 5. Nota-se novamente um comportamento linear entre as variáveis estudadas, para uma faixa de velocidades que vai de 10 até 30 km/h. Observou-se a partir das velocidades do vento obtidas e suas respectivas vazões mássicas, que os valores encontrados para as vazões foram mais baixos que aqueles indicados pelo fabricante, a empresa LUFTMAXI (vide Tabela 1). Vale ressaltar que a metodologia de caracterização do fabricante não foi especificada pelo mesmo.



**Figura 36** - Curva característica vazão mássica de ar-velocidade do vento.

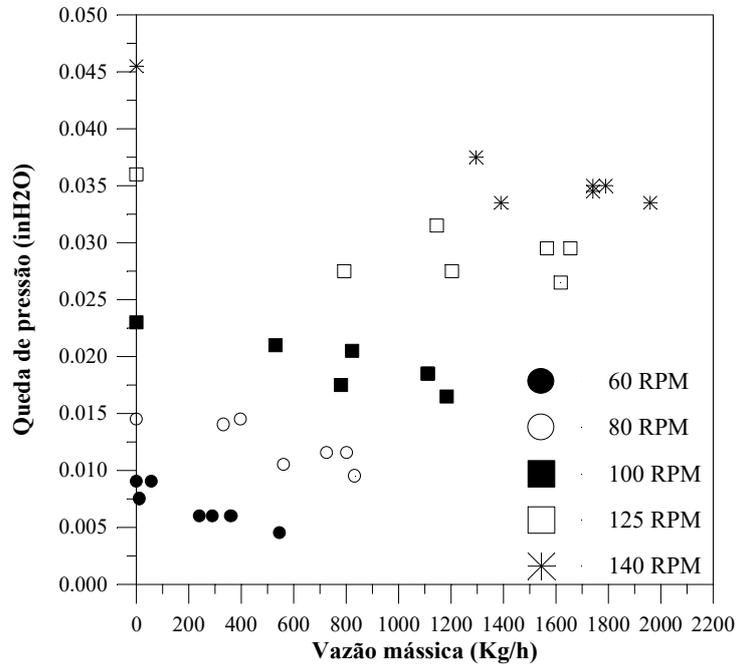
**Tabela 5** - Vazões mássicas impelidas pelo exaustor eólico e suas velocidades do vento.

<b>W</b> <b>(kg/h)</b>	<b>Velocidades médias</b> <b>(km/h)</b>
1183,5	30,1
1167,7	28,8
1031,3	26,2
805,6	23,6
835,2	23,5
669,1	20,0
571,6	17,8
545,7	17,0
473,4	15,7
387,9	14,5
295,4	13,7
270,5	11,8
232,9	11,3
207,7	10,9
173,8	10,2

#### 4.1.4 - Curvas vazões mássicas de ar-quedas de pressão

A Figura 37 apresenta a curva característica queda de pressão-vazão mássica de ar para diferentes rotações do exaustor. O comportamento das curvas mostrou-se similar às curvas de equipamentos típicos de propulsão de fluidos. Foram notadas quedas de pressão

até mesmo na presença da tela de maior abertura, confirmando a hipótese de que o equipamento é sensível a pequenas obstruções de fluxo.



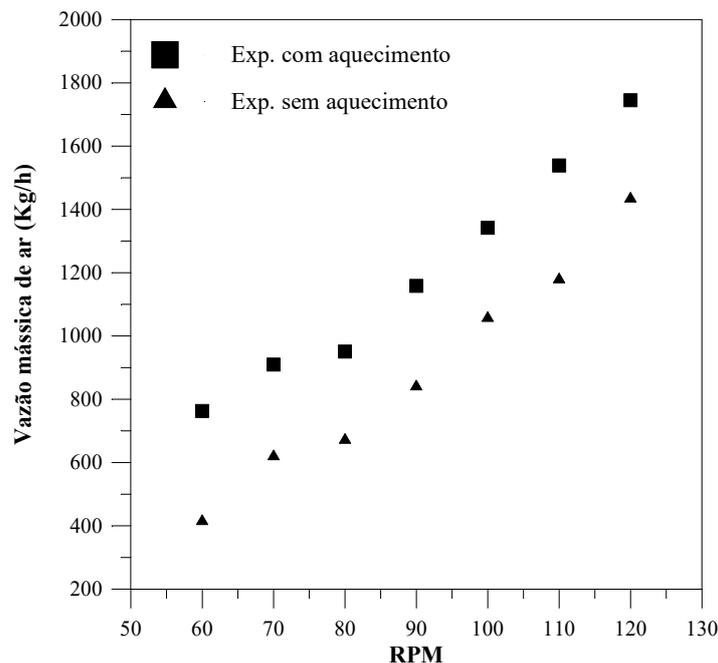
**Figura 37** - Curvas características quedas de pressão-vazões mássicas de ar para 60, 80, 100, 125 e 140 RPM.

As curvas características apresentadas nas Figuras 36 e 37 permitiram a completa caracterização do exaustor eólico, possibilitando, assim, o conhecimento da faixa operacional que permite a sua aplicação. A curva mostrada na Figura 36 permite a previsão da vazão mássica de ar movimentada pelo exaustor para o respectivos valores de velocidade do vento. A Figura 37 indica as quedas de pressão para os respectivos valores da vazão mássica do ar movimentada pelo exaustor.

#### 4.2 - Avaliação do efeito chaminé

A Figura 38 mostra o comportamento da vazão mássica de ar no equipamento para experimentos com e sem aquecimento. Os experimentos com aquecimento foram realizados com um acréscimo médio de 13°C em relação à temperatura ambiente externa e os experimentos sem aquecimento contaram com uma temperatura ambiente média de 25°C.

Percebe-se que os experimentos com aquecimento sofreram considerável acréscimo de vazão mássica em todos os valores de rotação, de 60 até 125 RPM. A temperatura mostrou-se influente para todos os valores experimentais de rotação, ao contrário dos experimentos de Scheid et al. (2002), nos quais para valores acima de 145 RPM, os efeitos inerciais suplantaram o efeito de temperatura de forma que os mesmos tornaram-se imperceptíveis. Acredita-se que a falta de isolamento térmico do silo tenha favorecido este comportamento.

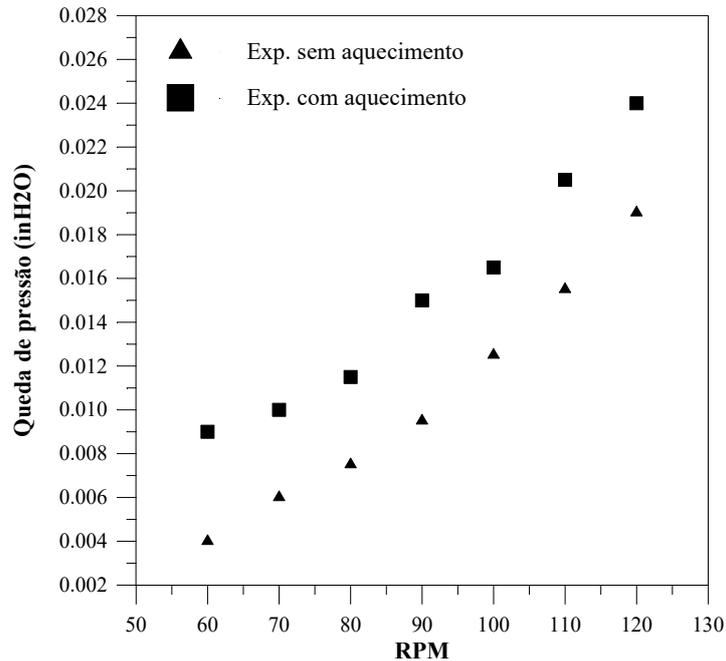


**Figura 38** - Vazões mássicas para os experimentos com aquecimento e sem aquecimento utilizando rotações de 60, 70, 80, 90, 100, 110, 120 RPM.

A Equação 08 é obtida por meio de um ajuste linear dos dados de vazão mássica de ar versus rotação encontrados para o experimento sem aquecimento. Esta equação corresponde aos efeitos inerciais de vazão mássica ocasionados pelo exaustor no interior da unidade experimental.

$$W_1 = (16,29) \cdot \text{RPM} - 578,61 \quad (08)$$

A Figura 39 dados experimentais, nas mesmas condições operacionais, agora relacionando as diferenças de pressão com o número de rotações do exaustor. Nota-se a similaridade com o comportamento das vazões mássicas, indicando também forte influência da temperatura na diferença de pressão para os experimentos com aquecimento.



**Figura 39** - Variação de pressão para os experimentos sem e com aquecimento na unidade experimental, para rotações de 60, 70, 80, 90, 100, 110 e 120 RPM.

A equação 09 é obtida a partir de um ajuste linear dos dados de variação de pressão versus rotação obtidos para o experimento sem aquecimento. Esta equação corresponde aos efeitos inerciais de queda de pressão ocasionados pelo exaustor na unidade experimental.

$$\Delta P_t = (2,464 \times 10^{-4}) \text{RPM} - 1,161 \times 10^{-2} \quad (09)$$

A partir das equações de Boulard & Baille (1997) e Perry & Chilton (1997), descrevendo a variação de pressão para o efeito de temperatura, e da Equação 09, obtida experimentalmente para descrever o comportamento sem aquecimento, foi possível propor um equacionamento unindo os efeitos de temperatura e inercial. Isto resulta nas equações 10 e 11 descrevendo cada uma delas, os efeitos de temperatura e inercial simultaneamente. As equações descrevendo os efeitos conjuntos são as seguintes:

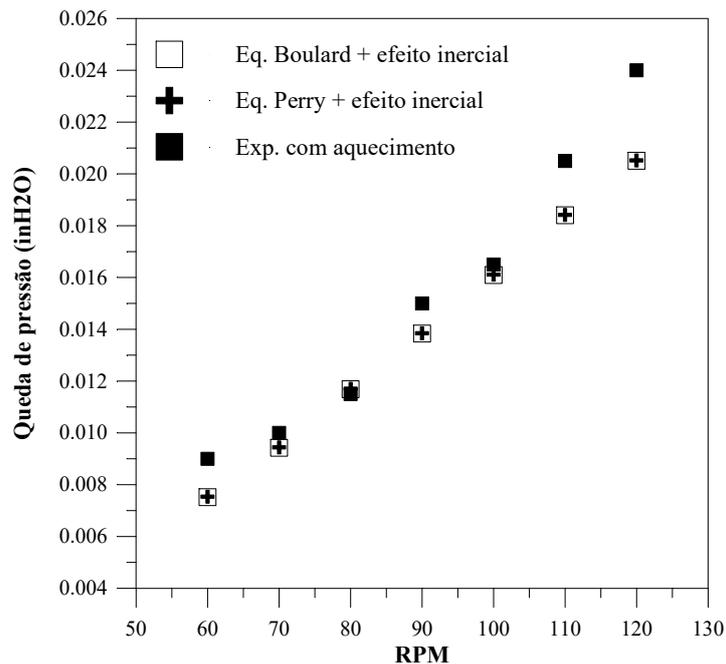
$$\Delta P_t = 4,0186 \times 10^{-3} \cdot \left( \rho \cdot (9,8) \cdot H \cdot \left( \frac{T_i - T_c}{T_i} \right) \right) + (2,464 \times 10^{-4}) \text{RPM} - 1,161 \times 10^{-2}, \quad (10)$$

sendo  $\Delta P_t$  a variação de pressão, em inH<sub>2</sub>O,  $T_i$ (K) e  $T_c$ (K), as temperaturas interna e externa, H representa a distância vertical percorrida pelo ar, em metros,  $\rho$  a densidade do ar Kg/m<sup>3</sup> e RPM o número de rotações por minuto do exaustor, e

$$\Delta P_t = P_b \cdot (0,256) \cdot H \cdot \left( \frac{1}{T_e} - \frac{1}{T_i} \right) + (2,464 \times 10^{-4}) \cdot \text{RPM} - 1,161 \times 10^{-2}, \quad (11)$$

sendo  $\Delta P$  a variação de pressão em inH<sub>2</sub>O,  $T_i$  e  $T_e$  as temperaturas interna e externa, em °R,  $H$ , representa a distância vertical percorrida pelo ar, em ft, RPM, o número de rotações do exaustor por minuto e  $P_b$ , a pressão barométrica, em inHg. Vale ressaltar que a equação 04 de Perry & Chilton (1997), que prediz a queda de pressão relacionada às perdas por atrito, não foi aplicada na Equação 11, em função dos baixos valores encontrados para estas quedas de pressão, as quais eram duas ordens de grandeza menores que os valores da tiragem teórica (Equação 03).

A Figura 40 mostra os valores de variação de pressão obtidos em experimentos com aquecimento (efeitos de temperatura e inercial) e os obtidos via Equações 10 e 11, podendo-se observar a concordância entre os pontos do gráfico e a funcionalidade das equações obtidas. Foram obtidos valores de queda de pressão idênticos para as equações provenientes de Boulard & Baille (1995) e Perry & Chilton (1997) com uma concordância acentuada de seus valores. A Tabela 6 compara os valores experimentais obtidos frente aos equacionamentos sugeridos e os respectivos desvios. Nota-se um desvio máximo de 21,1 % na rotação de 60 RPM para o exaustor e um desvio mínimo de 0,9 % para rotação de 80 RPM.



**Figura 40** - Variação de pressão para o experimento com aquecimento e aplicando as equações 10 e 11 na unidade experimental para rotações de 60, 70, 80, 90, 100, 110 e 120 RPM.

**Tabela 6** - Valores de variação de pressão provenientes das Equações 10 e 11 (efeito inercial + chaminé (Perry & Chilton)) e (efeito inercial + chaminé (Boulard & Baille)) e para o experimento com aquecimento na unidade experimental.

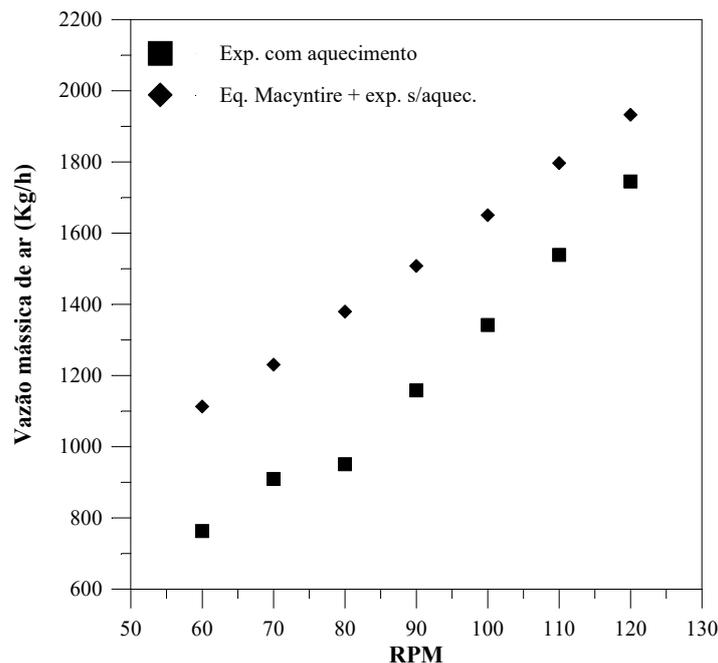
RPM	$\Delta P$ (in H <sub>2</sub> O) experimento com aquecimento	$\Delta P$ (in H <sub>2</sub> O) via Equação 10	DESVIOS %	$\Delta P$ (in H <sub>2</sub> O) via Equação 11	DESVIOS %
60	0,0090	0,0071	21,1	0,0075	16,7
70	0,0100	0,0091	9,0	0,0094	6,0
80	0,0115	0,0113	1,7	0,0116	0,9
90	0,0150	0,0135	10,0	0,0138	8,0
100	0,0165	0,0158	4,2	0,016	3,0
110	0,0205	0,0181	11,7	0,0183	10,7
120	0,0240	0,0202	15,8	0,0204	15,0
Médias			10,5		8,6

Seguindo a mesma linha de raciocínio, foi efetuado um estudo com a finalidade de prever a contribuição do efeito chaminé na vazão mássica operacional do equipamento utilizando a equação proposta por Macyntire (1990). Desta forma, a Equação 12 une os efeitos inercial e de temperatura para vazões mássicas de ar na unidade experimental. Foram somadas a equação de Macyntire (1990), descrevendo o efeito térmico, e já convertida para vazão mássica em Kg/h, e a parcela descrevendo a contribuição inercial de vazão mássica descrita pela Equação 08. A equação descrevendo os dois efeitos toma a forma:

$$W_i = (1,699)\rho(9,4)\sqrt{H(T_i - T_e)} + (16,28)RPM - 578,61 \quad (12)$$

sendo  $\rho$  a densidade do ar no interior do equipamento, em Kg/m<sup>3</sup>, H a altura da abertura em relação ao solo em ft, T<sub>i</sub> e T<sub>e</sub> as temperaturas interna e externa respectivamente em °F e RPM o número de rotações do exaustor por minuto.

A Figura 41 apresenta a relação entre as vazões mássicas de ar e número de rotações por minuto. As curvas referem-se aos experimentos com aquecimento (efeito de temperatura + inercial) e a aplicação da Equação 12 acima. Percebe-se, a partir das diferenças entre os valores de vazões mássicas das duas curvas, que a equação original de Macyntire (1990) para descrever a contribuição do efeito térmico não reproduz os valores experimentais obtidos. São encontrados via Equação 12 valores maiores do que aqueles obtidos experimentalmente via experimento com aquecimento.



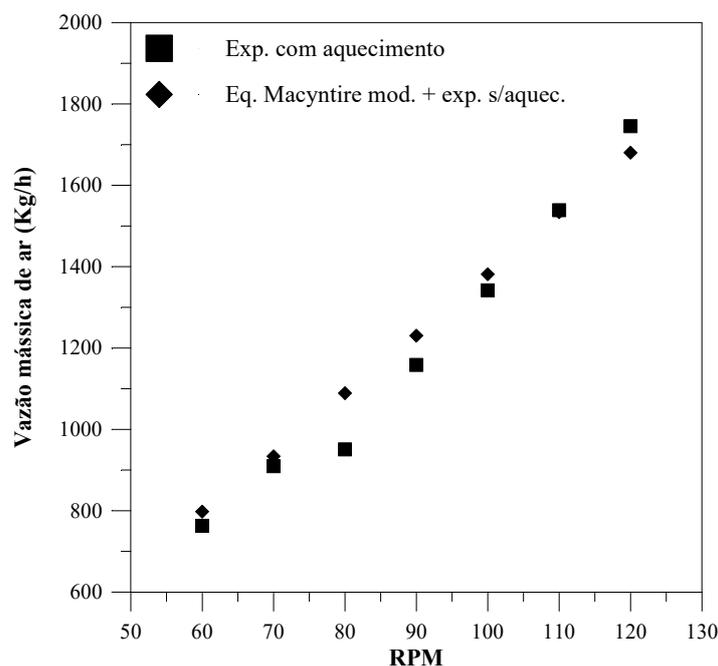
**Figura 41** - Vazões mássicas para uso da equação 12 (equação de Macyntire + equação obtida sem aquecimento) e para experimentos com aquecimento.

Por meio do programa STATISTICA, e usando como referência a subtração entre as vazões volumétricas experimentais com e sem aquecimento (contribuição de vazão volumétrica devido ao efeito chaminé), foi possível ajustar o parâmetro 9,4. Após o ajuste o parâmetro tem seu valor decrescido para 5,2.

Com a correção do parâmetro 9,4 foi possível modificar a Equação 12 que não descrevia com exatidão as contribuições dos efeitos de temperatura e inerciais juntos. Esta modificação corresponde a troca do parâmetro 9,4 da parcela referente ao efeito térmico pelo valor de 5,25, resultando na Equação 13:

$$W_t = (1,699) \cdot \rho \cdot (5,25) \cdot \sqrt{H \cdot (T_i - T_c)} + (16,28) \cdot \text{RPM} - 578,61 \quad (13)$$

A Figura 42 corresponde ao gráfico de vazão mássica versus rotação, mostrando a curva de aplicação da Equação 13 e, para os mesmos valores de rotações e variação de temperatura, os pontos experimentais com aquecimento (efeitos inercial e térmico juntos).



**Figura 42** - Vazões mássicas pelo uso da Equação 13 e para os experimentos com aquecimento.

O gráfico mostra uma maior concordância entre as curvas obtidas para os experimentos com aquecimento e via aplicação da Equação 13, confirmando sua adequação. A Tabela 7 mostra os desvios entre os experimentos com aquecimento e com a aplicação da Equação 13. Os mesmos mostram seu máximo de 14,61% na rotação de 80 RPM para o exaustor e seu mínimo de 0,03% para 110 RPM.

**Tabela 7** - Valores de vazão mássica de ar na unidade experimental para os experimentos com aquecimento e a partir da aplicação da Equação 13, e os seus respectivos desvios.

RPM	Vazão mássica Exp, com aquecimento	Vazão mássica via Equação 13	DESVIOS %
60	763,04	797,29	4,50
70	909,51	934,78	2,80
80	950,88	1089,81	14,60
90	1158,38	1233,38	6,50
100	1341,89	1384,79	3,20
110	1538,71	1538,28	0,03
120	1745,25	1685,97	3,40
Médias			5,0

Por meio das equações 10, 11 e 13 pode se efetuar a previsão de vazões mássicas operacionais e de quedas de pressão no exaustor eólico, bastando para isso informações de temperaturas interna e externa ao exaustor, altura de operação do equipamento e o valor da densidade do ar no seu interior.

### 4.3 - Secagem

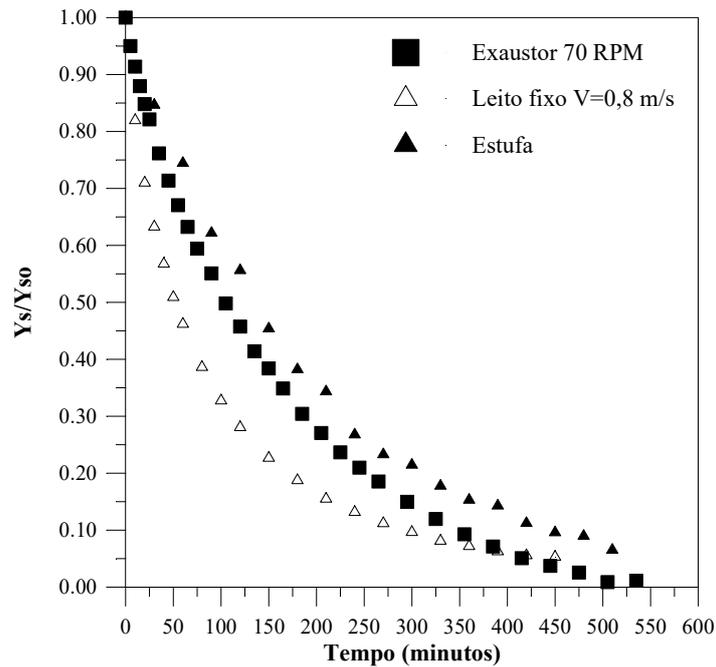
Foram realizados testes com diferentes materiais objetivando avaliar a influência das variáveis operacionais no processo de secagem com o exaustor. Além disso, comparou-se a performance do secador eólico com a secagem em estufa e por meio de um secador convectivo convencional de leito fixo. As condições experimentais de secagem encontram-se na Tabela 8:

**Tabela 8:** Condições operacionais dos experimentos de secagem.

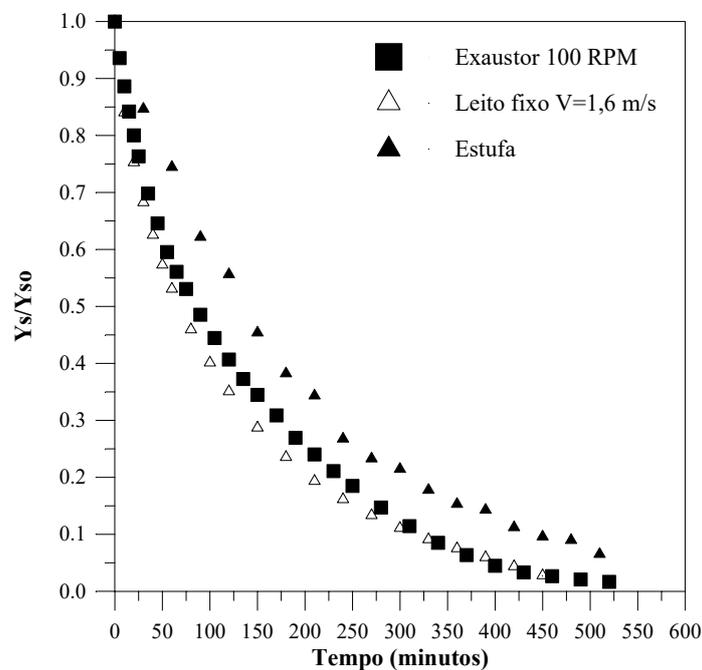
<b>Materiais</b>	<b>Experimento</b>	<b>RPM</b>	<b>Velocidade (m/s)</b>	<b>Y<sub>so</sub></b>	<b>T(°C)</b>
Capim-limão	Unidade eólica	70	0,8	2,86	36,6
	Unidade eólica	100	1,6	2,86	36,6
	Leito fixo	-	0,8	3,92	36
	Leito fixo	-	1,6	3,74	36
	Estufa	-	-	2,86	37,2
Abacaxi	Unidade eólica	70	0,8	5,67	36,6
	Unidade eólica	100	1,6	5,67	36,6
	Leito fixo	-	0,8	8,47	36,8
	Leito fixo	-	1,6	8,47	36
	Estufa	-	-	5,68	38,2
Sementes de tomate	Unidade eólica	70	0,8	0,31	46,3
	Unidade eólica	100	1,6	0,31	46,3
	Leito fixo	-	-	-	-
	Estufa	-	-	0,31	47,1

#### 4.3.1 - Secagem de capim-limão

As Figuras 43 e 44 mostram as curvas de secagem para os experimentos com capim-limão realizados com velocidades do ar de 0,8 m/s (70 RPM) e 1,6 m/s (100 RPM), respectivamente. Os experimentos com capim-limão revelaram que o comportamento da secagem por meio de exaustão eólica foi intermediário, com valores de quedas de umidade satisfatórios quando comparado com a secagem em estufa e em leito fixo sob as mesmas condições experimentais de temperatura e velocidade do ar de secagem.

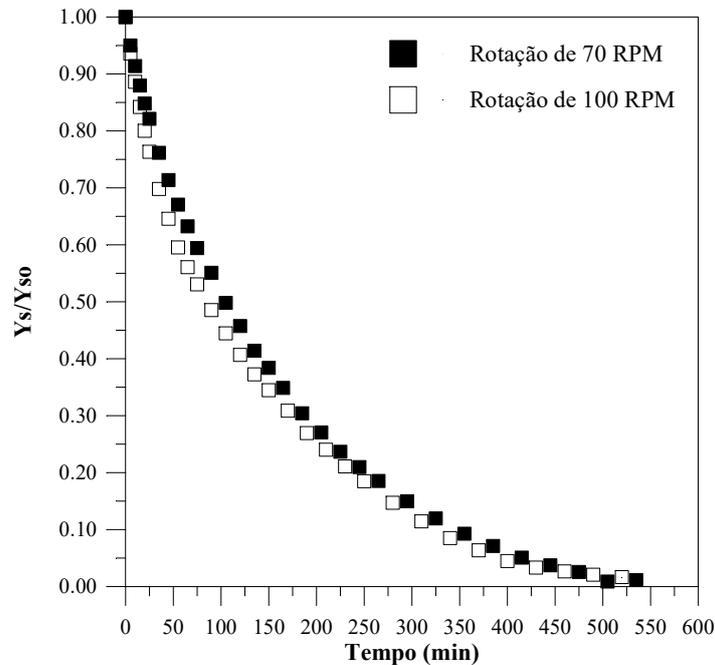


**Figura 43** - Curvas de secagem de capim-limão utilizando exaustor eólico em 70 RPM e com velocidade do ar de 0,8 m/s, para secagem em leito fixo com velocidade do ar de 0,8 m/s e em estufa. Temperaturas médias de 36,6; 36,0 e 37,2 °C, respectivamente.



**Figura 44** - Curvas de secagem de capim-limão utilizando exaustor eólico em 100 RPM e com velocidade do ar de 1,16 m/s, para secagem em leito fixo com velocidade de ar de 1,16 m/s e em estufa. Temperaturas médias de 36,6; 36,0 e 37,2 °C respectivamente.

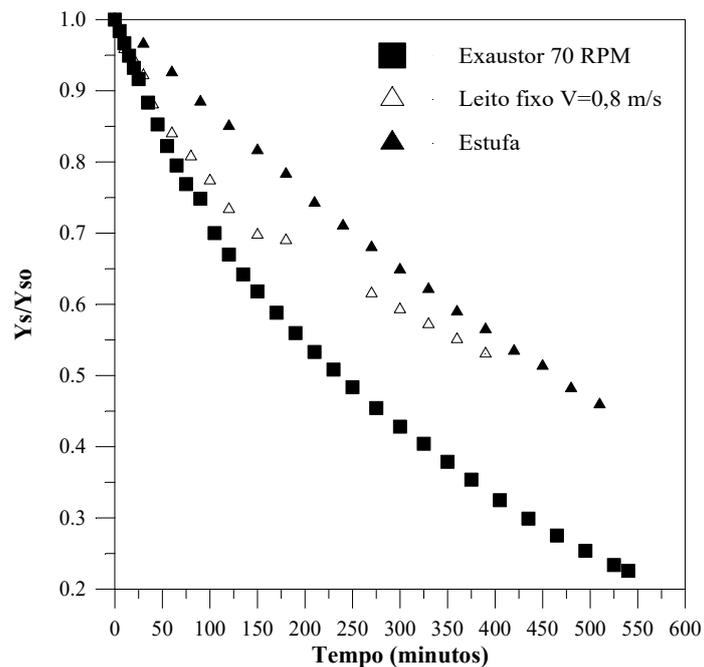
A Figura 45 mostra a influência da vazão mássica no experimento de secagem de capim-limão na unidade de secagem eólica, para experimentos com velocidade do ar de 0,8 e 1,16 m/s, o que corresponde aos valores de 70 e 100 RPM. Nota-se que, para o produto utilizado, a velocidade do ar não se mostrou muito influente sendo muito próximos os valores dos pontos experimentais.



**Figura 45** - Curvas de secagem de capim-limão utilizando exaustor eólico em 100 RPM e velocidade do ar de 1,16 m/s e 70 RPM com velocidade de 0,8 m/s.

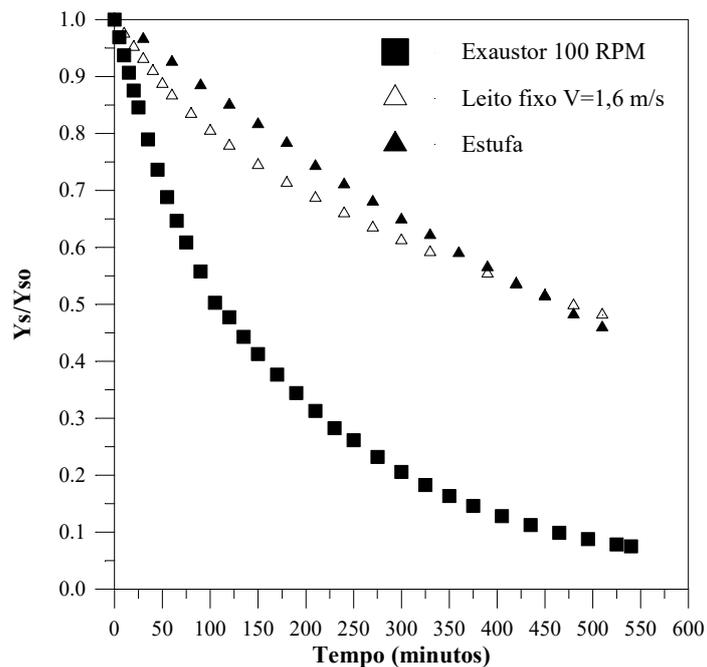
#### 4.3.2 - Secagem de abacaxi

A Figura 46 mostra o comportamento da secagem de abacaxi realizada na unidade experimental com 70 rotações para o exaustor eólico (velocidade do ar de secagem de 0,8 m/s), no leito fixo, com velocidade de 0,8 m/s e a secagem em estufa. A secagem por meio do exaustor eólico mostrou-se mais eficiente até mesmo frente ao uso do leito fixo em condições operacionais semelhantes para o ar de secagem.



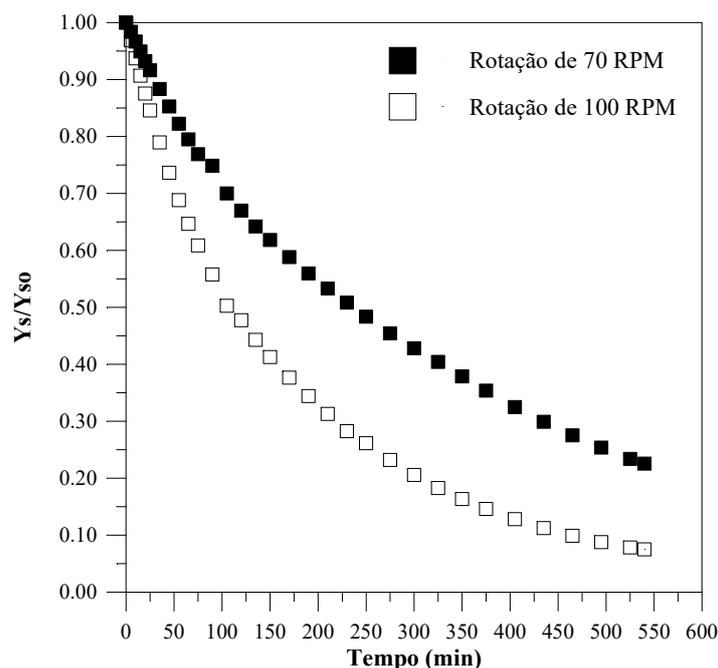
**Figura 46** - Curvas de secagem de abacaxi utilizando exaustor eólico em 70 RPM e velocidade do ar de 0,8 m/s, para secagem em leito fixo com velocidade do ar de 0,8 m/s e em estufa. Temperaturas médias de 36,6 °C; 36,0 °C e 37,2 °C, respectivamente.

A Figura 47 mostra o comportamento da secagem de abacaxi realizada na unidade experimental com 100 RPM para o exaustor eólico (velocidade do ar de secagem de 1,6 m/s), no leito fixo com velocidade igualmente de 1,6 m/s e a secagem em estufa. Nota-se um comportamento similar ao da Figura 46, sendo a utilização do exaustor eólico, para as condições experimentais citadas, mais eficaz.



**Figura 47** - Curvas de secagem de abacaxi utilizando exaustor eólico em 100 RPM e velocidade do ar de 1,16 m/s, para secagem em leito fixo com velocidade de ar de 1,16 m/s e em estufa. Temperaturas médias de 36,6; 36,0 e 37,2 °C respectivamente.

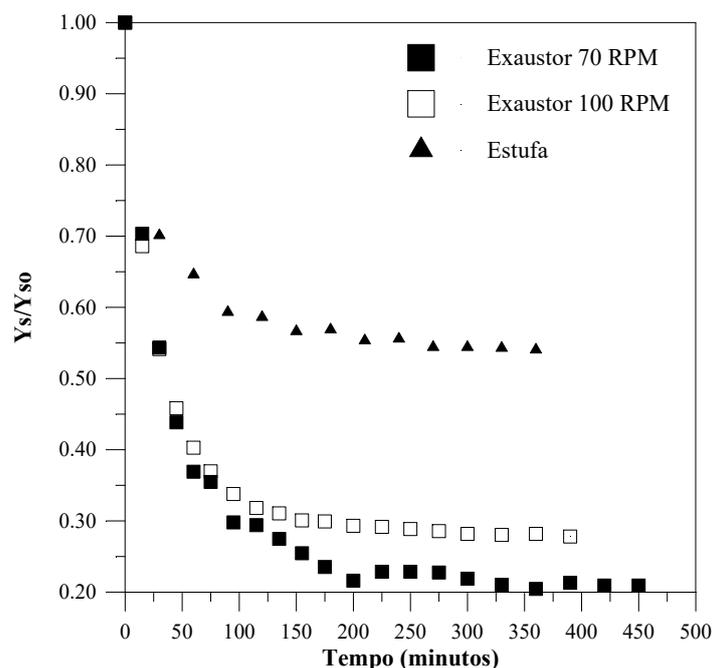
A Figura 48 apresenta a influência da vazão mássica de ar na secagem. São mostradas as curvas de secagem para experimentos na unidade de secagem eólica nas rotações de 70 e 100 RPM para o exaustor. Nota-se, ao contrário da secagem de capim-limão, uma maior influência da vazão mássica na secagem de abacaxi. O experimento de secagem a 100 RPM mostra claramente uma maior queda da umidade com o tempo.



**Figura 48** - Curvas de secagem de abacaxi utilizando exaustor eólico em 100 RPM e com velocidade do ar de 1,16 m/s, e para exaustor eólico utilizando 70 RPM e velocidade de 0,8 m/s.

#### 4.3.3 - Secagem de sementes de tomate

A Figura 49 mostra as curvas de secagem das sementes de tomate obtidas para experimentos na unidade de secagem em 70 e 100 RPM do exaustor e secagem em estufa. Os experimentos com as sementes de tomate na unidade experimental não revelaram uma grande influência da vazão mássica de ar na secagem. Em experimentos com as temperaturas médias muito semelhantes não houve influência da vazão no desempenho da secagem. As diferenças observadas entre as curvas de secagem para 70 e 100 RPM se devem possivelmente a diferença entre as umidades relativas do ar de secagem. A utilização do processo em leito fixo na secagem de tomate mostrou-se inviável devido a fluidização das amostras de semente, descaracterizando a metodologia de secagem adotada.



**Figura 49** - Curva de secagem de sementes de tomate em rotações de exaustor de 70 e 100 RPM e em estufa. Sob temperaturas médias de 46,3°C, 46,3°C e 47,1°C, respectivamente.

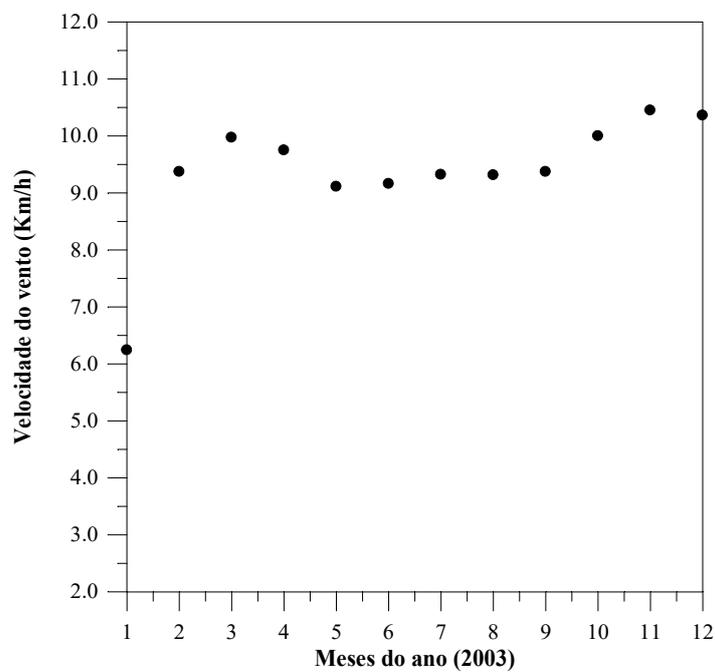
#### 4.4 - Obtenção do potencial eólico da região

A Tabela 9 e a Figura 50 ilustram os valores médios de velocidades do vento obtidos durante os meses de coleta na região de Seropédica (RJ). Foram coletados dados diários de velocidade do vento durante o período de janeiro a dezembro de 2003, que originaram valores médios mensais. Os dados obtidos referem-se somente à velocidade do vento nas dependências da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Uma estimativa mais apurada deve requerer mais pontos de coleta de dados.

A partir dos dados apresentados, tem-se como valor médio para a velocidade do vento ao longo dos 11 meses, 9,37 km/h o que representa 2,69 m/s. Resgatando-se a curva de caracterização do exaustor eólico vazão mássica-velocidade do vento, apresentada na Figura 36, percebe-se que esta velocidade é bastante baixa, ocasionando uma baixa vazão mássica do ar impelida pelo exaustor em possíveis experimentos de secagem. Isto leva a crer que a unidade de secagem eólica não possuiria seu potencial totalmente explorado se aplicada à região.

**Tabela 9** - Velocidade média do vento para os meses de coleta de dados.

Meses (2003)	Velocidade (km/h)
Janeiro	6,24
Fevereiro	9,37
Março	9,97
Abril	9,75
Maiο	9,11
Junho	9,16
Julho	9,32
Agosto	9,31
Setembro	9,37
Outubro	10,00
Novembro	10,45
Dezembro	10,36



**Figura 50** - Dados referentes à velocidade do vento na região de Seropédica (RJ).

## 5 - CONCLUSÕES

A caracterização do exaustor eólico revelou uma dependência linear para a curva de caracterização vazão mássica de ar-velocidade do vento. Enquanto que as curvas relacionando queda de pressão e vazão mássica, para diversas rotações do exaustor, mostraram um comportamento similar às curvas encontradas para o funcionamento de mecanismos propulsores de fluidos, por exemplo bombas. O comportamento das curvas também revelou que o exaustor eólico trata-se de um equipamento sensível às restrições de fluxo, sendo necessário o posicionamento dos produtos verticalmente no interior da unidade de secagem de forma a minimizando os efeitos de perda de carga.

A análise da contribuição do efeito chaminé pode ser conduzida pelas equações sugeridas de Boulard & Baille (1995) e Perry & Chilton (1997), quantificando a queda de pressão e Macyntire (1990) modificada, quantificando a vazão mássica. A influência da temperatura na unidade experimental mostrou-se presente em todas as rotações utilizadas para o exaustor, aumentando as quedas de pressão e as vazões mássicas de ar no interior da unidade experimental. Scheid et al. (2002), em seus experimentos, notou a influência da temperatura somente para rotações inferiores à 145 RPM possivelmente devido a ausência de isolamento térmico na unidade usada, ao contrário deste trabalho, no qual o isolamento foi adotado.

Nos experimentos de secagem para os materiais que apresentaram um efeito menos significativo da velocidade do ar (capim-limão e sementes de tomate), a secagem via exaustor eólico apresentou um desempenho equivalente aos demais secadores (leito fixo e estufa). Entretanto, para secagem de fatias de abacaxi, o exaustor apresentou um desempenho superior aos dos secadores tipo estufa e leito fixo, apesar da velocidade superficial do ar deste último ser a mesma do exaustor. Este fato deve-se, provavelmente, às diferenças fluidodinâmicas presentes nos secadores, que devem ser avaliadas, em etapas futuras, a partir de um conjunto de experimentos mais amplo.

O estudo do potencial eólico da região de Seropédica (RJ) mostrou valores de velocidade do vento em torno de 3,0 m/s, um valor considerado baixo, quando comparado ao valor médio máximo brasileiro, em torno de 8,0 m/s. Este fato leva a crer que o sistema de secagem eólica não mostraria um bom desempenho na região.

## 6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

São necessários mais testes a respeito da fluidodinâmica envolvendo a circulação de ar no interior do secador eólico. Esta necessidade se dá devido à comparação de resultados entre secagem de abacaxi via exaustor eólico e secagem em leito fixo onde a queda de umidade foi mais rápida na unidade de secagem eólica, o que até então não era esperado.

Sabe-se que o ar no equipamento percorre uma trajetória helicoidal no interior do silo, enquanto que em leito fixo o ar permeia homogênea e unidirecionalmente o leito. Experimentos com produtos sensíveis à vazão mássica de ar na secagem podem ser efetuados no intuito de comprovar a influência do movimento helicoidal da corrente de ar de secagem.

Testes com a unidade experimental em contato com o vento seriam de grande utilidade de forma a avaliar o equipamento em condições reais de operação.

## 7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, F.W. and HALL, C.W. *Drying cereal grains*, The AVI publishing Company, Inc., Westport, 1974.
- BOULARD, T.; BAILLE, A. *Modelling of Air Exchange Rate in a Greenhouse Equipped with Continuous Roof Vents*, 1995. INRA, Station of Bioclimatologie, B. P. 91,8413 Monfavet Cedex, France. J. Agric. Engng Res., v. 61, p. 37-48, 1995.
- Da SILVA L. S. *Secagem de sementes de hortaliças em leito fixo e fluidizado*. UFRRJ. Tese de M. Sc PPGEQ/UFRRJ, Seropédica, RJ, 2004.
- FOX, R. W. *Introdução à Mecânica dos Fluidos*, Rio de Janeiro, Editora Guanabara Koogan S. A., 1995.
- Giroar 2002. <http://www.b.com.br/~giroar/apresent.html>.
- KITTAS, C.; BOULARD, T.; MERMIER M., PAPADAKIS, G. *Wind Induced air exchange rates in a greenhouse tunnel with continuous side openings*. Journal of Agricultural Engineering Research, 65: p. 37 - 49, 1996.
- LIMA, A.C.C.; ROCHA, S., *Análise experimental da secagem de feijão em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado*, XXII ENEMP, Maringá PR, Anais, Vol.1, p.259-270, 1995.
- MACYNTIRE, A. J. *Ventilação industrial e controle da poluição*, Rio de Janeiro, Editora Guanabara Koogan S. A., 1990.
- PERRY, R. H., Chilton C. H., *Chemical engineers handbook*, McGraw-Hill, 1997.
- SCHEID, C.M.; HALASZ, M.T.; MASSARANI, G. *Caracterização de exaustor eólico para utilização em secadores*. Inc. Anais do XIV Congresso Brasileiro de Engenharia Química, CD ROM, Natal RN, 2002.
- SOKHANSANJ, S. J.; *Drying of foodstuffs*. In Mujundar A.S. editor. Handbook of industrial drying, 2. New York: Marcel Decker Inc.; 1995.

## 8 - APÊNDICES:

- **Apêndice A** - Dados experimentais referentes ao estudo do efeito de temperatura na unidade experimental.

Experimentos com a unidade eólica sem aquecimento com temperatura ambiente média de 24,7 °C.....	54
Experimentos com a unidade eólica com aquecimento com temperatura ambiente média de 24,7 °C.....	54

- **Apêndice B** - Dados de caracterização do exaustor eólico.

Dados experimentais referentes à curva de caracterização vazão mássica de ar-rotação do exaustor .....	55
Dados experimentais referentes à curva de caracterização velocidade do vento-rotação do exaustor .....	55
Dados experimentais referentes à curva de caracterização velocidade do vento-vazão mássica de ar .....	56
Dados experimentais referentes às curvas de caracterização quedas de pressão-rotações do exaustor.....	56

- **Apêndice C** - Velocidade do vento para os meses de coleta na região de Seropédica (RJ).

Velocidades do vento para os meses de coleta na região de Seropédica (RJ).....	58
--	----

- **Apêndice D** - Dados relacionados aos experimentos de secagem.

Secagem de sementes de tomate em rotações distintas.....	64
Secagem de sementes de tomate em estufa.....	65
Secagem de sementes de abacaxi em rotações distintas.....	66
Secagem de abacaxi em estufa.....	67
Secagem de abacaxi em leito fixo tradicional.....	68
Secagem de capim-limão em rotações distintas.....	69
Secagem de capim-limão em estufa.....	70
Secagem de capim-limão em leito fixo tradicional.....	71

**Apêndice A** - Dados experimentais referentes ao estudo do efeito de temperatura na unidade experimental.

- ❖ Experimentos com a unidade experimental sem aquecimento com temperatura ambiente média de 24,7°C.

<b>RPM</b>	<b><math>\Delta P(\text{inH}_2\text{O})</math></b>	<b>W(kg/h)</b>	<b>T(°C)</b>
60	0,004	400,52	24
70	0,006	598,62	24,2
80	0,0075	648,84	24,5
90	0,0095	811,94	25
100	0,0125	1021,11	25
110	0,0155	1139,32	25
120	0,019	1386,04	25,5

- ❖ Experimentos com a unidade experimental com aquecimento com temperatura ambiente média de 24,7°C.

<b>RPM</b>	<b><math>\Delta P(\text{inH}_2\text{O})</math></b>	<b>W(kg/h)</b>	<b>T<sub>I</sub>(°C)</b>	<b>T<sub>E</sub>(°C)</b>
60	0,0090	637,96	43,38	26,00
70	0,0100	909,19	42,14	27,00
80	0,0115	951,07	41,84	27,50
90	0,0150	1294,24	39,98	27,00
100	0,0165	1340,74	39,46	27,30
110	0,0205	1537,08	38,60	27,10
120	0,0240	1745,55	36,49	26,50

**Apêndice B** - Dados de caracterização do exaustor eólico.

- ❖ Dados experimentais referentes à curva de caracterização vazão mássica de ar-rotação do exaustor.

<b>RPM</b>	<b>W (kg/h)</b>
60	545,67
80	835,22
100	1183,46
120	1618,24
140	1959,43

- ❖ Dados experimentais referentes à curva de caracterização velocidade do vento-rotação do exaustor.

<b>RPM</b>	<b>Velocidades do vento (km/h)</b>
96,64	28,83
89,08	26,17
76,58	23,56
69,02	20,00
63,62	17,77
58,18	15,70
53,44	14,56
48,32	13,70
46,94	11,81
44,86	11,35
43,46	10,91
41,58	10,20

- ❖ Dados referentes à curva de caracterização velocidade do vento-vazão mássica de ar.

<b>W (kg/h)</b>	<b>Velocidades do vento (km/h)</b>
545,67	16,97
835,23	23,52
1183,46	30,07
1618,24	36,63
1959,43	43,18
1167,75	28,83
1031,27	26,17
805,61	23,56
669,13	20,00
571,65	17,77
473,44	15,70
387,87	14,56
295,44	13,70
270,53	11,81
232,98	11,35
207,71	10,91
173,77	10,20

- ❖ Dados referentes à curva de caracterização queda de pressão-rotação do exaustor.

<b>RPM</b>	<b>W(kg/h)</b>	<b><math>\Delta P(\text{inH}_2\text{O})</math></b>	<b>Área de abertura da tela (<math>\text{mm}^2</math>)</b>
60	0,00	0,0090	Uso de lona
60	361,66	0,0060	1 $\text{mm}^2$
60	13,18	0,0075	3 $\text{mm}^2$
60	57,84	0,0090	17,5 $\text{mm}^2$
60	243,04	0,0060	25 $\text{mm}^2$
60	290,21	0,0060	30 $\text{mm}^2$
60	545,67	0,0045	Sem tela

<b>RPM</b>	<b>W(kg/h)</b>	<b><math>\Delta P(\text{inH}_2\text{O})</math></b>	<b>Área de abertura da tela (<math>\text{mm}^2</math>)</b>
80	0,00	0,0145	Uso de lona
80	726,75	0,0115	1 $\text{mm}^2$
80	334,60	0,0140	3 $\text{mm}^2$
80	398,89	0,0145	17,5 $\text{mm}^2$
80	563,81	0,0105	25 $\text{mm}^2$
80	803,45	0,0115	30 $\text{mm}^2$
80	835,23	0,0095	Sem tela

<b>RPM</b>	<b>W(kg/h)</b>	<b><math>\Delta P(\text{inH}_2\text{O})</math></b>	<b>Área de abertura da tela (mm<sup>2</sup>)</b>
100	0,00	0,023	Uso de lona
100	1111,25	0,019	1 mm <sup>2</sup>
100	530,36	0,021	3 mm <sup>2</sup>
100	822,78	0,021	17,5 mm <sup>2</sup>
100	780,23	0,018	25 mm <sup>2</sup>
100	1111,58	0,019	30 mm <sup>2</sup>
100	1183,46	0,017	Sem tela

<b>RPM</b>	<b>W(kg/h)</b>	<b><math>\Delta P(\text{inH}_2\text{O})</math></b>	<b>Área de abertura da tela (mm<sup>2</sup>)</b>
125	0,00	0,036	Uso de lona
125	1565,57	0,030	1 mm <sup>2</sup>
125	792,64	0,028	3 mm <sup>2</sup>
125	1145,69	0,032	17,5 mm <sup>2</sup>
126	1203,22	0,028	25 mm <sup>2</sup>
125	1654,98	0,030	30 mm <sup>2</sup>
125	1618,24	0,027	Sem tela

<b>RPM</b>	<b>W(kg/h)</b>	<b><math>\Delta P(\text{inH}_2\text{O})</math></b>	<b>Área de abertura da tela (mm<sup>2</sup>)</b>
140	0,00	0,046	Uso de lona
140	1789,50	0,035	1 mm <sup>2</sup>
141	1741,23	0,035	3 mm <sup>2</sup>
141	1295,10	0,038	17,5 mm <sup>2</sup>
141	1390,24	0,034	25 mm <sup>2</sup>
140	1741,23	0,035	30 mm <sup>2</sup>
140	1959,43	0,034	Sem tela

**Apêndice C - Velocidade do vento para os meses de coleta na região de Seropédica (RJ).**

<b>Janeiro</b>	<b>Velocidade do vento (km/h)</b>
05/jan/03	5,90
06/jan/03	9,25
07/jan/03	10,91
08/jan/03	5,26
09/jan/03	12,53
12/jan/03	6,48
13/jan/03	16,74
14/jan/03	6,70
15/jan/03	10,40
16/jan/03	10,22
19/jan/03	1,72
20/jan/03	2,77
21/jan/03	3,5
22/jan/03	3,59
23/jan/03	2,04
26/jan/03	3,04
27/jan/03	3,29
28/jan/03	3,49
29/jan/03	3,44
30/jan/03	3,53

<b>Fevereiro</b>	<b>Velocidade do vento (km/h)</b>
02/fev/03	6,98
03/fev/03	9,22
04/fev/03	11,02
05/fev/03	8,24
06/fev/03	7,34
09/fev/03	4,28
10/fev/03	6,77
11/fev/03	5,44
12/fev/03	9,54
13/fev/03	13,82
16/fev/03	10,01
17/fev/03	5,72
18/fev/03	10,73
19/fev/03	10,40
20/fev/03	6,66
23/fev/03	10,73
24/fev/03	15,73
25/fev/03	12,20
26/fev/03	11,12
27/fev/03	11,34

<b>Março</b>	<b>Velocidade do vento (km/h)</b>
01/mar/03	11,48
02/mar/03	7,56
03/mar/03	9,68
04/mar/03	6,37
05/mar/03	10,33
08/mar/03	2,92
09/mar/03	10,69
10/mar/03	10,51
11/mar/03	10,19
12/mar/03	8,42
15/mar/03	13,28
16/mar/03	11,45
17/mar/03	10,37
18/mar/03	9,54
19/mar/03	8,32
22/mar/03	10,22
23/mar/03	11,95
24/mar/03	11,20
25/mar/03	11,74
26/mar/03	13,10

<b>Abril</b>	<b>Velocidade do vento (km/h)</b>
05/abr/03	7,60
06/abr/03	11,45
07/abr/03	7,52
08/abr/03	11,20
09/abr/03	10,91
12/abr/03	7,49
13/abr/03	9,90
14/abr/03	11,48
15/abr/03	15,16
16/abr/03	10,51
19/abr/03	9,50
20/abr/03	4,39
21/abr/03	8,10
22/abr/03	6,77
23/abr/03	9,61
26/abr/03	6,44
27/abr/03	13,50
28/abr/03	11,09
29/abr/03	10,48
30/abr/03	11,92

<b>Maio</b>	<b>Velocidade do vento (km/h)</b>
03/mai/03	1,87
04/mai/03	7,92
05/mai/03	4,97
06/mai/03	11,16
07/mai/03	10,15
10/mai/03	7,34
11/mai/03	10,01
12/mai/03	12,74
13/mai/03	6,12
14/mai/03	11,59
17/mai/03	9,00
18/mai/03	6,95
19/mai/03	11,48
20/mai/03	9,50
21/mai/03	7,99
24/mai/03	9,29
25/mai/03	11,41
26/mai/03	13,10
27/mai/03	8,57
28/mai/03	10,98

<b>Junho</b>	<b>Velocidade do vento (km/h)</b>
07/jun/03	5,69
08/jun/03	12,71
09/jun/03	10,19
10/jun/03	10,01
11/jun/03	9,97
14/jun/03	7,06
15/jun/03	9,65
16/jun/03	11,27
17/jun/03	10,62
18/jun/03	10,76
21/jun/03	5,60
22/jun/03	11,62
23/jun/03	11,59
24/jun/03	8,54
25/jun/03	8,93
28/jun/03	8,93
29/jun/03	7,72
30/jun/03	4,06

<b>Julho</b>	<b>Velocidade do vento (km/h)</b>
01/jul/03	2,20
02/jul/03	7,70
03/jul/03	2,81
04/jul/03	11,38
07/jul/03	9,25
08/jul/03	7,70
09/jul/03	12,49
10/jul/03	6,73
11/jul/03	10,84
14/jul/03	9,76
15/jul/03	10,33
16/jul/03	7,34
17/jul/03	8,32
18/jul/03	6,19
21/jul/03	6,98
22/jul/03	9,11
23/jul/03	10,26
24/jul/03	15,44
25/jul/03	8,50
28/jul/03	12,60
29/jul/03	12,96
30/jul/03	13,32
31/jul/03	12,24

<b>Agosto</b>	<b>Velocidade do vento (km/h)</b>
01/ago/03	9,86
04/ago/03	6,62
05/ago/03	9,22
06/ago/03	14,15
07/ago/03	10,26
08/ago/03	8,28
11/ago/03	12,78
12/ago/03	8,39
13/ago/03	9,76
14/ago/03	10,01
15/ago/03	9,83
18/ago/03	7,95
19/ago/03	5,20
20/ago/03	5,56
21/ago/03	7,00
22/ago/03	5,66
25/ago/03	8,38
26/ago/03	9,43
27/ago/03	12,47
28/ago/03	14,17
29/ago/03	10,44

<b>Setembro</b>	<b>Velocidade do vento (km/h)</b>
01/set/03	8,68
02/set/03	6,92
03/set/03	14,00
04/set/03	6,84
05/set/03	8,28
08/set/03	15,80
09/set/03	6,04
10/set/03	12,24
11/set/03	9,68
12/set/03	6,92
15/set/03	6,91
16/set/03	8,39
17/set/03	9,47
18/set/03	3,64
19/set/03	5,94
22/set/03	7,92
23/set/03	9,65
24/set/03	13,39
25/set/03	15,34
26/set/03	10,19
29/set/03	8,424
30/set/03	11,412

<b>Outubro</b>	<b>Velocidade do vento (km/h)</b>
01/out/03	6,05
02/out/03	10,22
03/out/03	5,90
06/out/03	10,22
07/out/03	9,54
08/out/03	14,83
09/out/03	2,41
10/out/03	8,35
13/out/03	11,38
14/out/03	9,72
15/out/03	9,58
16/out/03	8,93
17/out/03	10,84
20/out/03	15,05
21/out/03	7,69
22/out/03	11,09
23/out/03	9,72
24/out/03	8,38
27/out/03	11,65
28/out/03	11,68
29/out/03	15,15
30/out/03	12,70
31/out/03	8,90

<b>Novembro</b>	<b>Velocidade do vento (km/h)</b>
03/nov/03	8,17
04/nov/03	9,94
05/nov/03	10,62
06/nov/03	10,80
07/nov/03	6,73
10/nov/03	14,69
11/nov/03	11,12
12/nov/03	8,68
13/nov/03	9,79
14/nov/03	10,01
17/nov/03	10,87
18/nov/03	9,49
19/nov/03	6,05
20/nov/03	9,46
21/nov/03	9,13
24/nov/03	13,48
25/nov/03	14,43
26/nov/03	15,61
27/nov/03	9,76
28/nov/03	10,15

<b>Dezembro</b>	<b>Velocidade do vento (km/h)</b>
01/dez/03	7,63
02/dez/03	11,12
03/dez/03	12,60
04/dez/03	5,04
05/dez/03	9,40
08/dez/03	8,06
09/dez/03	10,01
10/dez/03	5,94
11/dez/03	12,46
12/dez/03	9,25
15/dez/03	10,33
16/dez/03	8,93
17/dez/03	13,50
18/dez/03	14,40
19/dez/03	10,37
22/dez/03	9,11
23/dez/03	11,45
24/dez/03	14,29
25/dez/03	10,58
26/dez/03	11,74
29/dez/03	11,02
30/dez/03	11,81
31/dez/03	9,20

**Apêndice D - Dados relacionados aos experimentos de secagem.**

<b>Secagem de sementes de tomate em rotações distintas</b>			
<b>Rotações:</b> 70 RPM		<b>Rotações:</b> 100 RPM	
<b>Temperatura:</b> 46,28°C		<b>Temperatura:</b> 46,32°C	
Tempo (min)	Ys/Yso	Tempo (min)	Ys/Yso
0	1	0	1
15	0,703359	15	0,68594
30	0,543482	30	0,5414
45	0,438502	45	0,45816
60	0,369157	60	0,40292
75	0,35471	75	0,36962
95	0,297886	95	0,33783
115	0,294034	115	0,31816
135	0,274771	135	0,31059
155	0,254546	155	0,30075
175	0,235283	175	0,29924
200	0,216021	200	0,29319
225	0,228542	225	0,29167
250	0,228542	250	0,28864
275	0,227578	275	0,28562
300	0,21891	300	0,28183
330	0,210242	330	0,28032
360	0,204464	360	0,28183
390	0,213132	390	0,27805
420	0,209279		
450	0,209279		

<b>Secagem de sementes de tomate em estufa</b>	
Temperatura:	49,11°C
Tempo(min)	Ys/Yso
0	1
30	0,70102
60	0,64592
90	0,59316
120	0,58612
150	0,56619
180	0,56854
210	0,55329
240	0,55564
270	0,54391
300	0,54391
330	0,54274
360	0,5404

<b>Secagem de abacaxi em rotações distintas</b>			
<b>Rotações:</b> 70 RPM		<b>Rotações:</b> 100 RPM	
<b>Temperatura:</b> 37,28°C		<b>Temperatura:</b> 37,48°C	
Tempo (min)	Ys/Yso	Tempo (min)	Ys/Yso
0	1	0	1
5	0,98389	5	0,968945
10	0,96667	10	0,93719
15	0,94928	15	0,906694
20	0,93223	20	0,875499
25	0,91629	25	0,845703
35	0,88339	35	0,789607
45	0,85272	45	0,73645
55	0,82239	55	0,688328
65	0,79497	65	0,646501
75	0,76892	75	0,608731
90	0,74853	90	0,557812
105	0,70004	105	0,502696
120	0,66996	120	0,477376
135	0,64212	135	0,442963
150	0,61821	150	0,412747
170	0,58823	170	0,376656
190	0,55961	190	0,344202
210	0,53313	210	0,312867
230	0,50829	230	0,282511
250	0,48353	250	0,261388
275	0,4544	280	0,232011
300	0,42818	310	0,205712
325	0,40419	340	0,18277
350	0,37883	370	0,163465
375	0,35381	400	0,146119
405	0,32485	430	0,128074
435	0,29906	460	0,112406
465	0,27524	490	0,098977
495	0,25382	520	0,087786
525	0,23386	550	0,078413
540	0,22563		

<b>Secagem de abacaxi em estufa</b>	
Temperatura:	37,28°C
Tempo (min)	Ys/Yso
0	1
30	0,96577
60	0,92562
90	0,88449
120	0,85026
150	0,81614
180	0,78304
210	0,7424
240	0,71032
270	0,67996
300	0,64864
330	0,62119
360	0,58954
390	0,56478
420	0,53432
450	0,51332
480	0,48178
510	0,45907
540	0,07789

<b>Secagem de abacaxi em leito fixo tradicional</b>			
<b>Velocidade:</b> 0,8 m/s		<b>Velocidade:</b> 1,16 m/s	
<b>Temperatura:</b> 36,0°C		<b>Temperatura:</b> 36,0°C	
Tempo (min)	Ys/Yso	Tempo (min)	Ys/Yso
0	1	0	1
10	0,958315	10	0,975
20	0,943127	20	0,95172
30	0,921477	30	0,93051
40	0,8806	40	0,90947
60	0,839884	50	0,88671
80	0,80757	60	0,86636
100	0,77364	80	0,83412
120	0,733409	100	0,80446
150	0,697379	120	0,77825
180	0,689785	150	0,74411
270	0,61514	180	0,71272
300	0,592681	210	0,68634
330	0,571839	240	0,65944
360	0,550673	270	0,63444
390	0,530477	300	0,61202
		330	0,59133
		390	0,55357
		420	0,53598
		450	0,51511
		480	0,49787
		510	0,48149

<b>Secagem de capim-limão em rotações distintas</b>			
<b>Rotações:</b> 70 RPM		<b>Rotações:</b> 100 RPM	
<b>Temperatura:</b> 36,59 °C		<b>Temperatura:</b> 36,59 °C	
Tempo (min)	Ys/Yso	Tempo (min)	Ys/Yso
0	1	0	1
5	0,9500	5	0,935682
10	0,9139	10	0,886243
15	0,8795	15	0,842085
20	0,8480	20	0,800326
25	0,8212	25	0,763367
35	0,7616	35	0,698089
45	0,7137	45	0,64577
55	0,6705	55	0,595372
65	0,6323	65	0,560813
75	0,5941	75	0,530574
90	0,5509	90	0,485455
105	0,4980	105	0,444656
120	0,4573	120	0,406738
135	0,4141	135	0,372659
150	0,3839	150	0,344819
165	0,3486	170	0,308821
185	0,3041	190	0,269462
205	0,2706	210	0,240183
225	0,2366	230	0,210903
245	0,2097	250	0,184984
265	0,1854	280	0,147065
295	0,1497	310	0,114426
325	0,1195	340	0,085147
355	0,0926	370	0,063548
385	0,0712	400	0,044828
415	0,0507	430	0,033309
445	0,0372	460	0,026589
475	0,0255	490	0,020829
505	0,0087	520	0,016509
535	0,0112		

<b>Secagem de capim-limão em estufa</b>	
Temperatura:	37,25°C
Tempo (min)	Ys/Yso
0	1
30	0,846555
60	0,744257
90	0,621501
120	0,556031
150	0,453734
180	0,382127
210	0,343254
240	0,267554
270	0,232773
300	0,214359
330	0,177533
360	0,152981
390	0,142752
420	0,112063
450	0,095695
480	0,089557
510	0,065006

<b>Secagem de capim-limão em leito fixo tradicional</b>			
<b>Velocidade:</b> 0,8 m/s		<b>Velocidade:</b> 1,16 m/s	
<b>Temperatura:</b> 36,01°C		<b>Temperatura:</b> 36,01°C	
Tempo (min)	Ys/Yso	Tempo (min)	Ys/Yso
0	1	0	1
10	0,819575	10	0,8402978
20	0,709752	20	0,7528251
30	0,632505	30	0,6824999
40	0,567347	40	0,6252087
50	0,508873	50	0,5729121
60	0,461686	60	0,5305246
80	0,386104	80	0,4592912
100	0,327222	100	0,4011186
120	0,280443	120	0,3506115
150	0,226584	150	0,2869902
180	0,18732	180	0,2352011
210	0,154755	210	0,1932677
240	0,131366	240	0,1612434
270	0,111741	270	0,1333002
300	0,096287	300	0,110763
330	0,080837	330	0,09091808
360	0,071649	360	0,07513294
390	0,062462	390	0,0593478
420	0,055358	420	0,04356266
450	0,052856	450	0,02777752

## **9 - ANEXOS:**

### **Anexo 1:**

Trabalho apresentado e publicado nos anais XV COBEQ – Congresso Brasileiro de Engenharia Química – A Engenharia Química e o Crescimento Sustentável, realizado de 26 a 29 de setembro de 2004, sob o título "Secagem utilizando exaustor eólico" e sob numeração 2180.

### **Anexo 2:**

Trabalho apresentado e submetido à publicação nos anais do XXXI ENEMP - Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, realizado de 24 a 27 de outubro de 2004 em Uberlândia-MG sob o título de "Secagem utilizando exaustor eólico parte II".