

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**MODELO FUZZY PARA OBTENÇÃO DO TEMPO DE AERAÇÃO  
EM SILOS VERTICAIS VISANDO REDUZIR O CONSUMO  
DE ENERGIA ELÉTRICA**

**LUIZ FRANCISCO DA CRUZ**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP  
Junho-2001

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CAMPUS DE BOTUCATU

**MODELO FUZZY PARA OBTENÇÃO DO TEMPO DE AERAÇÃO  
EM SILOS VERTICAIS VISANDO REDUZIR O CONSUMO  
DE ENERGIA ELÉTRICA**

**LUIZ FRANCISCO DA CRUZ**

*Orientador:* **Prof. Dr. Nelson Miguel Teixeira**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da UNESP – Campus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia – Área de Concentração em Energia na Agricultura.

BOTUCATU-SP  
Junho-2001

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E  
TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO  
SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - FCA  
UNESP - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

C957m Cruz, Luiz Francisco da, 1956-  
Modelo fuzzy para obtenção do tempo de aeração em  
silos verticais visando reduzir o consumo de energia  
elétrica / Luiz Francisco da Cruz. - Botucatu : [s.n.],  
2001  
xiii, 102 f. : il. color.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista,  
Faculdade de Ciências Agronômicas  
Orientador: Nelson Miguel Teixeira  
Bibliografia: f. 99-102

1. Grãos - Aeração 2. Fuzzy, Teoria - Modelos  
matemáticos 3. Energia elétrica - Consumo I. Nelson  
Miguel Teixeira II. Universidade Estadual Paulista.  
Faculdade de Ciências Agronômicas III. Título

Palavras-chave: Aeração de grãos; Teoria fuzzy; Modelo matemá-  
tico; Energia elétrica; Consumo

## DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a meus pais, que nunca mediram esforços para proporcionarem, ao longo de toda minha vida, acesso ao estudo e à educação. A meus irmãos José Osvaldo e Silvia Maria que sempre me incentivaram na realização deste trabalho.

Dedico especialmente a minha esposa Beatriz e as minhas filhas Tamara e Lívia, que souberam entender a importância desta conquista e muito contribuíram para sua concretização.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Nelson Miguel Teixeira, do Departamento de Engenharia Rural – UNESP – Campus de Botucatu, que desde o início acreditou e incentivou a realização deste trabalho e pela sua imediata presença sempre que solicitado.

Aos Professores e Funcionários do Departamento de Matemática – UNESP – Campus de Bauru, que proporcionaram a minha total disponibilidade para realização deste trabalho.

Aos Professores e Funcionários do Departamento de Engenharia Rural – UNESP – Campus de Botucatu, que sempre estiveram presentes quando da minha necessidade.

Ao Diretor da Faculdade de Engenharia – UNESP – Campus de Bauru, Prof. Dr. Edwin Avolio, por toda sua colaboração para que eu pudesse realizar este trabalho e pelo total acesso ao laboratório de pesquisa LAI – Laboratório de Acionamento e Automação Industrial do Departamento de Engenharia Elétrica.

A Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Vanilda Miziara Mello Chueiri e Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Eliete Maria Gonçalves do Departamento de Matemática – UNESP – Campus de Bauru, pelo incentivo.

## SUMÁRIO

	<b>Página</b>
LISTA DE QUADROS.....	VII
LISTA DE FIGURAS.....	VIII
LISTA DE SÍMBOLOS.....	XI
1. RESUMO.....	1
2. SUMMARY.....	3
3. INTRODUÇÃO.....	5
3.1 Aeração.....	5
3.2 Teoria Fuzzy.....	8
3.3 Objetivos.....	9
4. REVISÃO DE LITERATURA.....	12
4.1 Definição e objetivos da aeração.....	12
4.2 Condução da aeração.....	16
4.3 Características dos silos.....	20
4.4 Tempo de resfriamento de uma célula de grãos.....	22
4.5 Consumo de energia elétrica por período de aeração.....	25
4.6 Análise da redução do consumo de energia elétrica em função das características de operação do ventilador.....	28
4.7 Características dos motores de indução operando com frequência variável.....	34
4.8 Conjuntos e Lógica Fuzzy: Fundamentos.....	36
4.9 Teoria Fuzzy: Aplicabilidade.....	43

5. MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
5.1 Materiais.....	45
5.2 Métodos.....	46
5.2.1 Modelo fuzzy para obtenção do tempo de aeração.....	46
5.2.1.1 Determinação dos conjuntos fuzzy.....	48
5.2.1.2 Índice de identificação dos conjuntos fuzzy.....	50
5.2.1.3 Grau de aderência.....	51
5.2.1.4 Grau de aderência complementar.....	52
5.2.1.5 Regras fuzzy.....	52
5.2.1.6 Tabela fuzzy.....	53
5.2.1.7 Recuperação da importância do tempo de aeração.....	57
5.2.1.8 Tempo de aeração.....	57
5.2.2 Modelo fuzzy para a condução racional da aeração.....	58
5.2.3 Modelo fuzzy para obtenção da frequência.....	65
6. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	74
6.1 Modelo fuzzy para a obtenção do tempo de aeração.....	74
6.2 Modelo fuzzy para a condução racional da aeração.....	83
6.3 Modelo fuzzy para a obtenção da frequência.....	87
7. CONCLUSÃO.....	94
7.1 Modelo fuzzy para obtenção do tempo de aeração.....	94
7.2 Modelo fuzzy para a condução racional da aeração.....	95
7.3 Modelo fuzzy para a obtenção da frequência.....	96
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99

## LISTA DE QUADROS

<b>Quadro</b>	<b>Página</b>
1. Velocidade síncrona em função da frequência para um motor de 4 pólos.....	31
2. Nomenclatura e símbolo para os conjuntos fuzzy de $\Delta\theta$ e $U$ .....	50
3. Tempo de aeração $t_{aer}$ em função de $\Delta\theta$ e $U$ que representa o comportamento do sistema de aeração.....	53
4. Nomenclatura, símbolo e valor atribuído para os conjuntos fuzzy de $t_{aer}$ .....	54
5. Nomenclatura e símbolo para os conjuntos fuzzy de $\Delta\theta_d$ .....	59
6. Nomenclatura e símbolo para os conjuntos fuzzy de $\varepsilon$ .....	60
7. Nomenclatura e símbolo para os conjuntos fuzzy de $\Psi$ .....	62
8. Condução Racional da Aeração ( $\Psi$ ).....	63
9. Nomenclatura, símbolo e valor atribuído para os conjuntos fuzzy de $\Delta t_{aer}$ .....	67
10. Frequência do motor ( $f$ ) em função do acréscimo do tempo de aeração ( $\Delta t_{aer}$ ) e da variação da temperatura $\Delta\theta$ .....	69
11. Nomenclatura, símbolo e valor atribuído para os conjuntos fuzzy de $f$ .....	70
12. Comparação entre o método convencional e o modelo desenvolvido para a condução racional da aeração ( $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ , $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ e $U = 14\%$ ).....	85
13. Resultados da simulação apresentada.....	89

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura</b>	<b>Página</b>
1. Curva de equilíbrio ar-trigo a 20°C.....	16
2. Diagrama da condução racional da aeração.....	18
3. Propagação da zona de resfriamento.....	22
4. Comportamento das grandezas características de um ventilador centrífugo em função da velocidade do motor.....	29
5. Comportamento do ventilador e do sistema.....	30
6. Diagrama esquemático de um conversor de frequência.....	32
7. Comparação das grandezas nominais de vários dispositivos semicondutores de potência.....	32
8. Relação Volts/Hertz.....	33
9. Curva do conjugado em função da velocidade do motor para vários valores da frequência, com a relação Volts/Hertz constante.....	34
10. Função de pertinência a, b e c.....	40
11. Variável lingüística temperatura.....	42
12. Conjuntos fuzzy para a variação da temperatura do grão.....	49
13. Conjuntos fuzzy para a umidade do grão.....	49
14. Conjuntos fuzzy para o tempo de aeração do grão.....	54
15. Conjuntos fuzzy para a diferença de temperatura do grão e do ar externo.....	58
16. Conjuntos fuzzy para a umidade relativa do ar externo.....	59
17. Conjuntos fuzzy para a condução racional da aeração.....	62

18. Conjuntos fuzzy para o acréscimo do tempo de aeração.....	67
19. Conjuntos fuzzy para a frequência.....	70
20. Cálculo do tempo de aeração em função da temperatura final do grão utilizando o método convencional e o modelo para: $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ , $U = 14\%$ e $\varepsilon = 80\%$ .....	75
21. Cálculo do tempo de aeração em função da temperatura final do grão para vários valores da umidade do grão ( $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ e $\varepsilon = 80\%$ ).....	76
22. Cálculo do tempo de aeração em função da temperatura inicial do grão utilizando o método convencional e o modelo para: $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ , $U = 14\%$ e $\varepsilon = 80\%$ .....	77
23. Cálculo do tempo de aeração em função da temperatura inicial do grão para vários valores da umidade do grão ( $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ e $\varepsilon = 80\%$ ).....	78
24. Cálculo do tempo de aeração em função da umidade do grão utilizando o método convencional e o modelo para: $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ , $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ e $\varepsilon = 80\%$ .....	79
25. Cálculo do tempo de aeração em função da umidade do grão para vários valores da temperatura final do grão ( $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ e $\varepsilon = 80\%$ ).....	80
26. Cálculo do tempo de aeração em função da umidade relativa do ar utilizando o método convencional e o modelo para: $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ , $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ e $U = 14\%$ .....	81
27. Cálculo do tempo de aeração em função da umidade relativa do ar para vários valores da umidade do grão ( $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ e $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ ).....	82
28. Cálculo do tempo de aeração em função da temperatura final do grão para vários valores da temperatura inicial ( $U = 14\%$ e $\varepsilon = 80\%$ ).....	83
29. Simulação da condução racional da aeração utilizando o método convencional e o modelo para $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ , $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ e $U = 14\%$ .....	84

30. Cálculo da frequência em função do acréscimo no tempo de aeração utilizando o modelo para $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ , $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ , $U = 14\%$ , $\varepsilon = 80\%$ e $t_{aer} = 112$ horas.....	86
31. Consumo de energia elétrica em função do acréscimo no tempo de aeração para $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ , $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ , $U = 14\%$ e $\varepsilon = 80\%$ .....	88
32. Porcentagem da redução do consumo de energia elétrica em função do acréscimo no tempo de aeração para $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ , $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ , $U = 14\%$ e $\varepsilon = 80\%$ .....	89
33. Vazão total em função do acréscimo no tempo de aeração para $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ , $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ , $U = 14\%$ e $\varepsilon = 80\%$ .....	90
34. Perda de carga em função do acréscimo no tempo de aeração para $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ , $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ , $U = 14\%$ e $\varepsilon = 80\%$ .....	90
35. Consumo de energia elétrica em função da frequência para $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ , $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ , $U = 14\%$ e $\varepsilon = 80\%$ .....	91
36. Vazão total em função da frequência para $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ , $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ , $U = 14\%$ e $\varepsilon = 80\%$ .....	91
37. Potência mecânica em função da frequência para $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ , $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ , $U = 14\%$ e $\varepsilon = 80\%$ .....	92
38. Potência elétrica em função da frequência para $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ , $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ , $U = 14\%$ e $\varepsilon = 80\%$ .....	92
39. Perda de carga em função da frequência para $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ , $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ , $U = 14\%$ e $\varepsilon = 80\%$ .....	93

## LISTA DE SÍMBOLOS

$c_a$	:	Calor específico do ar (kJ/kg, °C)
$c_g$	:	Calor específico do grão (kJ/kg, °C)
$f$	:	Frequência do motor (Hz)
$f_i$	:	Recuperação da importância das regras fuzzy para a frequência
$H$	:	Altura da célula (m)
$I$	:	Índice de identificação de intervalo
$J$	:	Índice de identificação de intervalo
$K$	:	Índice de identificação de intervalo
$k_1$	:	Coeficiente devido à natureza do grão $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (\text{cm/s})^{-1}\right)$
$k_2$	:	Coeficiente devido à natureza do grão $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (\text{cm/s})^{-2}\right)$
$n$	:	Vazão específica ( $\text{m}^3/\text{h} \cdot \text{m}^3$ )
$P$	:	Potência elétrica absorvida pelo ventilador (kW)
$P_e$	:	Potência absorvida na rede (kW)
$Q$	:	Vazão total do ventilador ( $\text{m}^3/\text{h}$ )
$r_a$	:	Massa específica do ar ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$r_g$	:	Massa específica do grão ( $\text{kg}/\text{m}^3$ )
$S$	:	Seção da célula ( $\text{m}^2$ )
$t_{aer}$	:	Tempo de aeração (h)

$t_H$	:	Tempo para a zona de resfriamento percorrer a altura $H$ (h)
$t_i$	:	Recuperação da importância das regras fuzzy para o tempo de aeração
$T$	:	Torque no eixo do motor (Nxm)
$T_v$	:	Torque no eixo do ventilador (Nxm)
$U$	:	Umidade do grão (%)
$v_a$	:	Velocidade do ar (cm/s)
$v_g$	:	Velocidade da zona de resfriamento (m/h)
$W_e$	:	Energia elétrica consumida na rede (kWh)
$\Delta p_g$	:	Perda de carga devido ao grão (mmca)
$\Delta p$	:	Perda de carga total (mmca)
$\Delta \theta$	:	Variação da temperatura do grão (°C)
$\Delta \theta_d$	:	Diferença entre a temperatura do grão e do ar (°C)
$\Delta t_{aer}$	:	Acréscimo no tempo de aeração (h)
$\varepsilon$	:	Umidade Relativa do ar (%)
$\mu$	:	Grau de aderência
$\mu'$	:	Grau de aderência complementar
$\mu_{Ri}$	:	Regras fuzzy
$\eta$	:	Rendimento do motor (%)
$\theta_i$	:	Temperatura inicial do grão (°C)
$\theta_f$	:	Temperatura final do grão (°C)
$\theta_g$	:	Temperatura do grão (°C)
$\theta_{ar}$	:	Temperatura do ar (°C)

$\omega$	:	Velocidade do eixo do motor (rpm)
$\omega_1$	:	Ponto de operação de velocidade do ventilador (rpm)
$\omega_2$	:	Ponto de operação de velocidade do ventilador (rpm)
$\omega_s$	:	Velocidade síncrona do motor (rpm)
$\Psi$	:	Condução Racional da aeração
$\Psi_i$	:	Recuperação da importância das regras fuzzy para a condução da aeração

## **1 RESUMO**

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um modelo matemático, baseado na Teoria Fuzzy, para calcular o tempo de aeração em silos verticais que atenda as necessidades tanto para o armazenamento como para a conservação de grãos, utilizando a energia elétrica de forma racional.

O objetivo principal para este trabalho foi o desenvolvimento da aeração de forma racional. O modelo desenvolvido permite a verificação da possibilidade e a necessidade de aerar uma certa massa de grãos, através da análise das condições de temperatura e umidade do grão e do ar externo.

Através deste modelo, é possível determinar o tempo de aeração necessário para que uma certa massa de grãos atinja as condições desejadas para o armazenamento. O tempo de aeração é obtido em função da umidade e temperatura inicial do grão, da umidade relativa e temperatura do ar externo, cujos valores podem ser obtidos através de sensores ou fornecidos pelo operador; é também função da umidade e temperatura finais do grão (condição desejada para o armazenamento), da quantidade de grãos a ser aerada, da vazão específica do ventilador e das dimensões do silo. O tempo de aeração, determinado através

destes dados será definido como tempo de aeração de referência, com o motor que aciona o ventilador operando com tensão e frequência nominais.

A utilização racional de energia elétrica, ou seja, a redução do consumo de energia elétrica durante o período de aeração, está baseada na possibilidade de alimentar o motor de indução que aciona o ventilador através de um conversor de frequência que permite a operação com velocidade variável. O modelo desenvolvido permite a obtenção da frequência necessária da tensão de alimentação para que o motor opere com velocidade reduzida e, em função das características do ventilador, possibilite realizar o trabalho de aeração com um consumo de energia elétrica consideravelmente menor.

Todos os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos através de simulações realizadas no laboratório de pesquisa LAI – Laboratório de Acionamento e Automação Industrial do Departamento de Engenharia Elétrica - UNESP/Bauru. Este laboratório possui toda a infra-estrutura necessária de informática, além de um conjunto completo de acionamento para motores de indução, alimentado por conversor de frequência do tipo PWM e um sistema de medição totalmente automatizado, através de um sistema de aquisição de dados via computador digital.

FUZZY MODEL TO CALCULATE AERATION TIME IN VERTICAL SILOS TO  
REDUCE ELECTRIC ENERGY CONSUME.

Botucatu, 2001. 102p. Tese (Doutorado em Agronomia/Aeração) - Faculdade de  
Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: LUIZ FRANCISCO DA CRUZ

Adviser: NELSON MIGUEL TEIXEIRA

## **2 SUMMARY**

This work develops a mathematical model based on Fuzzy Theory in which it is possible to calculate aeration time in vertical silos attempting to storing and maintaining grains using electrical energy in its best possibilities.

The main objective is, in effect, to improve the process of aeration. The model developed allows for checking possibilities and necessities in the aeration of a given quantity of grains, analysing its temperature and humidity. Model also detects the best time for aeration, verifying the best conditions to storage.

Time of aeration is given as a function in which the variables are initial humidity and temperature of the grains and weather conditions. These variables are given by sensors or by users. Aeration time is also a function of final humidity and temperature of the

grains (the best condition to storage), grain quantity to be involved in the process of aeration, dimension of the silos and, finally, the air that came from the ventilator used. These data help in getting the time of aeration which is, in its turn, defined not in an absolute way, but as a referential time of aeration.

Reduction in the use of electric energy during this process is based on the possibility in using an engine of induction which allows the ventilator to work through a converter of frequency with which the activity can be done in a motion not uniform. Our model gives the best frequency to reduce this motion. This feature and other features related to the ventilator give us, as a result, the reduction in the use of electric energy in the process of aeration.

Data used in this research came from simulations made in a lab in the Department of Electric Engineering in UNESP at Bauru. In this lab, that has a perfect groundwork in technology and a complete system to test mechanical engines, all the processes are automatized being the data given by digital computers.

---

**Keywords:** Fuzzy, silo, aeration, electric energy

### **3 INTRODUÇÃO**

#### **3.1 Aeração**

A aeração é a passagem forçada de ar através de uma massa de grãos ensilada, visando tanto prevenir ou solucionar problemas de conservação do produto, como promover a secagem. A aeração é, atualmente, a técnica mais utilizada para melhorar as condições de secagem e armazenamento.

Uma outra técnica utilizada para fazer o arejamento periódico de grãos armazenados a granel é a transilagem, a qual consiste na transferência da massa de grãos de uma célula para outra através de uma esteira rolante. Assim, na transilagem, o arejamento é feito passando o produto pelo ar e na aeração o ar passa pelo produto. Comparando essas duas técnicas, pode-se observar que na transilagem quem se movimenta é o grão e na aeração o grão fica armazenado e quem se movimenta é o ar. A transilagem deixou de ser utilizada devido às desvantagens apresentadas em relação à aeração, dentre elas o seu alto custo, uma vez que prescinde da reserva de células vazias para fazer a movimentação dos grãos, o alto índice de quebras e danos no tegumento dos grãos devido à movimentação da massa, o curto

período de exposição do grão em contato com o ar, sendo necessário aplicar várias repetições para obter o arejamento desejado.

Nos Estados Unidos e Europa a técnica de aeração é empregada desde o início da década de 40. Nos dias de hoje, ela é utilizada, praticamente, em todos os países produtores de grãos, com técnicas de controle avançadas e equipamentos modernos, fazendo com que o sistema de aeração seja a parte mais importante no projeto de um silo, uma vez que seus benefícios são de fundamental importância para o produtor. Ela é adotada na maioria dos silos existentes nos países de clima temperado. No Brasil, principalmente nos estados da região sul e estado de São Paulo apresentam condições favoráveis para o emprego da aeração. Em muitas regiões tropicais da América do Sul, a aeração é empregada com vistas a manter, pelo resfriamento, a qualidade do produto. Nas regiões tropicais, onde não é possível a obtenção de ar frio, a aeração deve ser usada com cuidado, considerando que, em alguns casos, podem ser obtidos resultados negativos. Entretanto, vários trabalhos experimentais foram realizados em países de clima quente, como a Austrália e Israel, e o benefício da aeração tem sido amplamente constatado na prática, como relata Puzzi (1973).

Para se fazer uma aeração, primeiramente, deve-se definir qual é a finalidade, como por exemplo: armazenar uma certa massa de grãos e manter sua umidade relativa em 13% e a temperatura em 20°C. Basicamente, a aeração depende da temperatura e umidade do grão e da temperatura e umidade relativa do ar externo. Para o controle da temperatura, na massa de grãos, empregam-se as instalações de termometria, as quais são constituídas por uma rede de sensores de temperatura, dispostos de forma regular nas células de estocagem dos silos. O mesmo ocorre no controle da umidade. Aparelhos chamados umidistatos, que operam, também, através de sensores, são instalados nas células. Ambos os

sensores são ligados a um quadro de controle, que indica a temperatura e a umidade em vários níveis da massa de grãos. Esses aparelhos permitem o operador escolher o momento oportuno para se fazer uma aeração e quanto deve ser sua duração. Assim, ele pode ligar ou desligar os ventiladores conforme as necessidades. Com ajuda de cálculos matemáticos, é possível determinar o tempo de aeração necessário para que uma determinada massa de grãos, a partir das condições iniciais, atinja as condições finais desejada de armazenamento. Desta forma, o operador do silo poderá programar o sistema de aeração com maior precisão e conforme as necessidades exigidas.

Atualmente, existem controles automáticos de aeração, os quais são pouco usados no Brasil, devido ao seu desconhecimento e custo mais elevado. Eles operam utilizando termostatos e umidistatos que são ajustados para comandar o desligamento dos ventiladores de acordo com as condições do tempo, permitindo que a aeração continue durante a noite, com aproveitamento total dos períodos que permitem a operação, principalmente sendo desligados nos horários de ponta. Existem, também, silos totalmente informatizados com a aplicação de programas computacionais capazes de operar o sistema de aeração de forma mais adequada e precisa, mas são raros no Brasil.

O consumo de energia elétrica, por período de aeração, também é uma das grandes preocupações dos produtores. Uma vez que a produção de energia elétrica está se tornando crítica em nosso país, esta deve ser usada racionalmente. Além disso, a política tarifária das concessionárias faz com que o alto custo da energia elétrica seja um dos principais responsáveis em agregar valor ao produto final. Dessa forma, todo esforço para desenvolver tecnologia para sistemas de aeração em silos deve ter como um dos objetivos principais a redução do consumo de energia elétrica.

É possível reduzir o consumo de energia elétrica por período de aeração. Quando se observam as leis que regem o funcionamento do conjunto motor-ventilador do sistema de aeração do silo, pode-se notar o grande potencial de economia de energia elétrica, quando o motor de indução é alimentado por um conversor de frequência permitindo que o sistema opere com velocidade variável. Desta forma, ao reduzir a frequência ocorrerá uma redução da velocidade do motor, o que acarretará uma grande redução da potência absorvida e, portanto, o consumo de energia elétrica. Com a redução da velocidade ocorre uma redução da vazão fornecida pelo ventilador, portanto, seria necessário aumentar o tempo de aeração para atingir as condições exigidas de armazenamento. Contudo, monitorando-se as condições de umidade e temperatura da massa de grãos, pode-se aumentar o tempo de aeração sem que haja prejuízo do armazenamento da massa de grãos.

### **3.2 Teoria Fuzzy**

Na década de sessenta, o professor Zadeh, da Universidade de Berkeley, USA, trabalhando com inteligência artificial, considerou que a rigidez da teoria usual de conjuntos era incompatível com a implementação satisfatória de sistemas especializados, pois estes, sendo softwares interativos, capazes de tomar algumas decisões, alicerçados nos conjuntos usuais com tomadas de decisões binárias, não contemplavam todo o espectro de escolha desenvolvido pela mente humana no dia-a-dia.

Dada a necessidade de ferramentas mais flexíveis, ele sugeriu, neste período, uma teoria alternativa de conjuntos, onde a passagem da pertinência para a não pertinência fosse gradual e não abrupta. Dessa maneira, surgiram os Conjuntos Fuzzy.

Com o desenvolvimento desses elementos de teoria, os estudos desenvolvidos permitiram vislumbrar a possibilidade de se caminhar teoricamente, pois, com os conjuntos fuzzy, crescia a possibilidade de interpretação de fenômenos não quantitativos e vagos, sendo porém, necessário buscar mecanismos para inferência a partir desses dados. Como os sistemas lógicos são intimamente relacionados com conjuntos, o passo seguinte foi dado em direção à construção de uma lógica capaz de adequar os conjuntos fuzzy ao raciocínio do senso comum. Tal sistema denomina-se “Lógica Fuzzy”.

Na tentativa de construir a Lógica Fuzzy, significativos resultados foram aparecendo e despertando o interesse de outros campos de estudo, principalmente aqueles que desenvolvem tecnologia elétrica, eletrônica e computacional. Esses conceitos fuzzy têm contribuído, acentuadamente, para o desenvolvimento de áreas como a lingüística, teoria de controle, teoria de informação, modelos de reconhecimento, análise de decisão, recuperação de informação, psicologia e teoria de autômatos ou robótica, onde tem surgido um grande número de máquinas capazes de decisões, as quais são chamadas de máquinas inteligentes.

### **3.3 Objetivos**

Diante do exposto, e devido à grande aplicabilidade da Teoria Fuzzy, o presente trabalho tornou possível o desenvolvimento de um modelo matemático baseado na Teoria Fuzzy, para sistemas de aeração em silos verticais, que possa atender as necessidades do agricultor, tanto no armazenamento adequado dos seus produtos para obter uma melhor e maior conservação, como também no aspecto do consumo de energia elétrica.

As seguintes condições são aplicadas a este modelo:

- A massa de grãos é proveniente dos secadores com umidade de armazenamento desejada (entre 13 e 15%) e alta temperatura. Ao ser depositada nas células de armazenamento, deverá ser aerada para reduzir sua temperatura aos níveis desejados (entre 15° a 25°C, dependendo da região).
- A aeração de manutenção é prevista neste modelo. Nesta situação, a massa de grãos já se encontra depositada nas células, com umidade e temperatura de armazenamento desejadas. Caso haja aumento da temperatura da massa de grãos, a aeração é iniciada, fazendo com que os grãos voltem à condição inicial de armazenamento, solucionando problemas de aquecimento, ou a qualquer momento que se desejar aerar a massa de grãos para simples manutenção das condições de armazenamento.

A utilização do modelo desenvolvido neste trabalho tem como objetivos específicos:

- Conduzir racionalmente a aeração (verificar a possibilidade de aerar ou não uma certa massa de grãos, em função das condições iniciais de temperatura e umidade do grão e do ar externo).
- Determinar o tempo de aeração necessário para que uma certa massa de grãos atinja as condições desejadas de armazenamento, em função da umidade e temperatura do grão e do

ar externo, vazão específica do ventilador e dimensões da célula de armazenamento (diâmetro da base e altura).

- Determinar a frequência necessária para que o motor opere com velocidade variável, reduzindo o consumo de energia elétrica por período de aeração, em função do acréscimo do tempo de aeração e das condições de umidade e temperatura do grão.

## **4 REVISÃO DE LITERATURA**

### **4.1 Definição e objetivos da aeração**

A aeração é a movimentação de ar ambiente adequado através da massa de grãos para melhores condições de armazenamento, conforme Puzzi (1986). Segundo Silva (1995), a aeração é a passagem forçada do ar através da massa de grãos, visando prevenir ou solucionar problemas de conservação do produto. Lasseran (1981) define a aeração ou ventilação como sendo a circulação forçada do ar ambiente através da massa de grãos.

O objetivo essencial da aeração é o resfriamento e a manutenção do grão a uma temperatura suficientemente baixa para assegurar uma boa conservação. A secagem de grãos também se constitui em mais um objetivo. Assim, a aeração da massa de grãos ensilada tem dois efeitos simultâneos, com um período de realização bastante diferenciado, sendo que, num primeiro tempo, relativamente curto, equilibra-se a temperatura do grão àquela do ar externo, podendo ainda ocasionar um abaixamento suplementar da temperatura em relação ao ar: é o efeito de resfriamento; num segundo momento, após um

longo período de aplicação da aeração, o efeito obtido pode ser a secagem. Tanto em um caso como no outro, os fenômenos físicos que comandam as trocas de calor e água são decorrentes das leis de equilíbrio entre o ar e o grão, segundo Lasseran (1981).

Dentre as várias utilidades da aeração as principais são:

- Resfriamento e a manutenção da massa de grãos ensilada a uma temperatura suficientemente baixa, para assegurar uma boa conservação; outro interesse pode ser a secagem;
- Prevenir o aquecimento e o umedecimento da massa de grãos;
- Promover a remoção de odores na massa de grãos;
- Inibir a atividade de insetos e o desenvolvimento da microflora, evitando o aparecimento de fungos que deterioram o produto.

Os conjuntos que compõem um sistema de aeração visam, principalmente, a distribuição uniforme da movimentação do ar através da massa de grãos, de tal forma que todas as zonas das células sejam aeradas de forma homogênea. Os principais componentes de um sistema de aeração são os seguintes:

- As células do silo que armazenam a massa de grãos;
- Condutores perfurados para conduzir e distribuir o ar através da massa;
- Tubos de conexão que ligam os ventiladores aos condutores;
- Os ventiladores para insuflação ou sucção do ar.

O conjunto ventilador-motor constitui a parte mais importante dos componentes de um sistema de aeração. Ele é selecionado em função do volume de ar necessário para vencer determinada pressão estática. Trata-se, portanto, de selecionar um conjunto que possa atender uma ou mais células de um silo, cheio com diferentes grãos, que serão armazenados na unidade. Existem vários tipos de ventiladores, tais como: ventiladores helicoidais, ventiladores axiais de uma ou duas hélices, ventiladores centrífugos, ventiladores de pás curvadas para frente, entre outros. A utilização ou recomendação de cada um deles depende, basicamente, do tamanho da célula do silo, da quantidade e do tipo da massa de grãos a ser aerada e do fluxo de ar necessário. Através de cálculos matemáticos, é possível dimensionar o conjunto ventilador-motor quanto ao tipo a ser usado, o fluxo de ar necessário e a potência do motor. Alguns acessórios podem ser aplicados ao conjunto ventilador-motor, tais como: dispositivos redirecionadores, difusor ou divergente, pavilhão de aspiração, controle de velocidade, entre outros. Cada um visando uma necessidade e um melhor rendimento do conjunto.

A transilagem é uma técnica empregada em silos, a qual consiste na transferência da massa de grãos de uma célula para outra, através de uma esteira rolante. A massa de grãos ao passar pelo ar é então ventilada. A temperatura pode ser reduzida com a movimentação dos grãos e eliminar possíveis “bolsas” de calor que tenham se formado no meio da massa. No Brasil, durante muitos anos, foi utilizada a técnica de transilagem. Nos dias de hoje, alguns poucos silos mais antigos e ultrapassados ainda utilizam essa técnica. A maioria dos silos mais novos e modernos fazem uso da aeração, por ser a transilagem uma técnica inviável e ultrapassada. A transilagem pode, em alguns casos, resolver o problema da “migração da umidade”. Entretanto, a ventilação provocada na massa de grãos é pequena,

exigindo várias transilagens, causando grande dispêndio de energia e danos mecânicos nos grãos.

Puzzi (1986) e Silva (1995) apontam as seguintes vantagens da aeração em relação à transilagem:

- prescinde da reserva de células vazias para a realização da transilagem;
- não apresenta as quebras e danos no tegumento dos grãos pela movimentação da massa;
- permite custos acentuadamente mais baixos por tonelada resfriada;
- na transilagem, como os grãos passam através do ar por um período reduzido de tempo, tornam-se necessárias, para um arejamento satisfatório da massa de grãos, repetidas operações.

O resfriamento da massa de grãos pode impedir o desenvolvimento de insetos e fungos. Cereais mantidos em temperaturas baixas podem ser armazenados com teores de umidade de 14 a 15%. Em um micro-clima frio, os grãos destinados ao plantio (sementes) têm também poder germinativo preservado por mais tempo.

Uma massa de grãos mais fria guarda melhor característica de armazenamento. Entretanto, o principal objetivo da aeração é manter uma temperatura uniforme nos grãos armazenados, impedindo, assim, a migração da umidade, como relata Puzzi (1986).

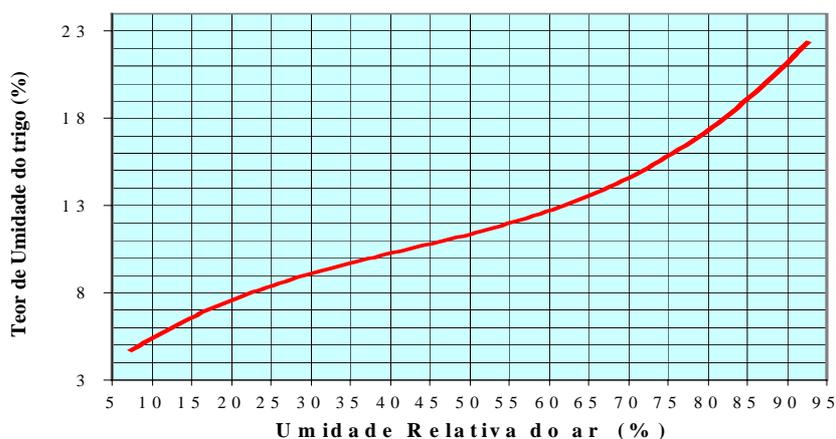
## 4.2 Condução da aeração

Definida a finalidade da aeração, basicamente ela dependerá de quatro variáveis: temperatura do grão, temperatura do ar, umidade do grão e umidade do ar.

O grão é um produto higroscópico, isto é, pode ceder ou absorver umidade do ar que o envolve. Assim, o teor de umidade dos grãos armazenados fica em equilíbrio com a umidade relativa do ar intergranular.

De um modo geral, os grãos se encontram com teor de umidade adequado para o armazenamento quando estão em equilíbrio com uma umidade relativa máxima de 70% do ar intergranular, segundo Puzzi (1986). Esta condição indica que, durante a aeração, a umidade relativa do ar externo não deve ser superior a 70%, a fim de não ocasionar um aumento da umidade dos grãos. A Figura 1 mostra um exemplo da curva de equilíbrio entre o ar e o trigo.

Lasseran (1981) sugere que a aeração de grãos armazenados (12 a 14% de umidade), no verão, é mais conveniente no período noturno, quando é maior a possibilidade de arrefecimento.



**Figura 1. Curva de equilíbrio ar-trigo a 20°C**

Existem várias opiniões sobre o momento mais conveniente para realizar uma aeração. Alguns pesquisadores aconselham a aeração sempre que a temperatura do ar externo for de 5° a 8°C inferior à da porção mais quente do grão. Uns acham que o intervalo da diferença de temperatura entre o ar e o grão deve ser de 5° a 6°C. Outros afirmam que a aeração é sempre possível quando a temperatura do ar externo for inferior à do grão. Outros, ainda, aconselham a aeração quando a temperatura do ar externo for 6°C inferior à temperatura do grão, mas que isso depende da umidade relativa do ar e da massa de grãos. Uma grande maioria afirma que, para uma boa aeração, a diferença de temperatura entre o ar e o grão e a umidade do ar e do grão, devem pesar, conjuntamente, para a decisão final. De uma forma geral, quase unânime, os pesquisadores recomendam a aeração usando o critério da diferença de temperatura entre o ar e o grão. (De Beer-1972; Burrel-1973; Lasseran-1981; Puzzi-1986; Silva-1995).

Assim, pode-se verificar que a temperatura é a variável fundamental para a realização efetiva da aeração, já que o objetivo principal do processo consiste na remoção, o mais rápido possível, do calor retido pela massa de grãos armazenada.

No entanto, a aeração nem sempre é possível, pois, dependendo das condições de temperatura e umidade do grão e do ar externo, este processo pode ser prejudicial à massa de grãos ensilada. Portanto, é necessário estabelecer critérios para que se possa saber quando deve ser feita a aeração.

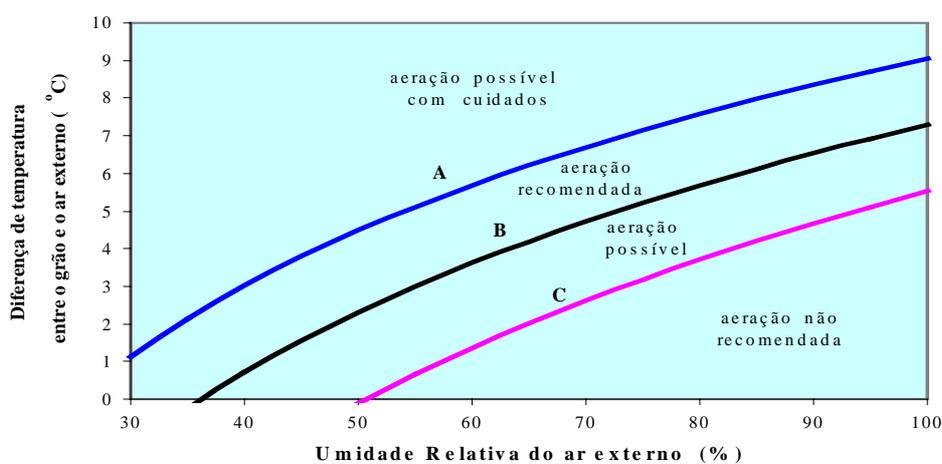
De uma forma geral, deve-se ter em mente os quatro fatores fundamentais citados acima, ou seja: umidade do grão (teor de água do grão) e temperatura do grão, umidade relativa do ar externo e temperatura média do ar externo, para proceder a aeração.

Um método prático de conduzir a aeração consiste no controle da amplitude da diferença da temperatura média dos grãos e do ar externo. Resultados comprovam que é possível aerar com ar ambiente externo apresentando níveis de umidade relativamente elevados (80 a 90%), desde que a temperatura do ar externo seja, pelo menos, 6°C mais baixa que a temperatura da massa de grãos. No entanto, se a temperatura do ar externo for 2,5°C mais baixa que a temperatura da massa de grãos, a aeração só é recomendada se a umidade do ar externo estiver compreendida entre 30 e 50%.

A Figura 2 mostra o método de condução racional da aeração, mais conhecido como *Diagrama de Condução da Aeração*, desenvolvido pelo *Instituto Técnico de Cereais e Forragens*, situado na França, o qual se aplica aos cereais cuja umidade se aproxima das normas.

Segundo Lasseran (1981), este diagrama resulta de uma construção teórica, mas verificada na prática, cujos elementos de base foram:

- Diagrama de Mollier (gráfico psicrométrico);
- As curvas de equilíbrio entre a umidade relativa do ar e o teor de água do grão.



**Figura 2. Diagrama da condução racional da aeração**

Neste diagrama, para a região superior à curva “A”, tendo umidade relativa baixa, haverá super-secagem da massa de grãos e, se a umidade relativa for alta e a temperatura externa baixa, poderá ocorrer condensação. Nestes regiões, a aeração pode ser feita apenas em caso de necessidade, ou seja, é preferível socorrer a massa de grãos que está se deteriorando mesmo que esta venha a reumidecer ou super secar . Na região entre as curvas “A” e “B”, a aeração é recomendada; contudo, nos extremos desta região pode ocorrer os mesmos fenômenos descritos acima. A região compreendida entre as curvas “B” e “C” permite aeração, porém, com cuidados para evitar umidecimento da massa de grãos. Fazer aeração com ar nas condições compreendidas entre a curva “C” e os eixos levar ao risco de umidecer os grãos. Portanto, a operação só deve ser efetuada em casos de grande necessidade.

Atualmente, existem sistemas de aeração controlados manualmente, onde, somente através da monitoração da temperatura e umidade do grão armazenado, são acionados os ventiladores, deixando-os em funcionamento o tempo necessário para atingir a temperatura e a umidade desejada, desligando-os em seguida. Controladores automáticos, bem mais sofisticados, também são utilizados, com a mesma finalidade, só que em menor quantidade, pelo desconhecimento de tal tecnologia e seu maior custo. Os controladores são equipados com termostatos e umidistatos, ambos acoplados a um painel de controle, passando por um microprocessador associado a um microcomputador e dispositivos eletrônicos auxiliares. Segundo a temperatura e umidade da massa de grãos, os termostatos e umidistatos são ajustados para ligarem ou desligarem os ventiladores, de acordo com as condições do tempo (curva de equilíbrio ar-grão). A monitoração contínua de temperatura e umidade faz com que o controlador entre em funcionamento, automaticamente, quando for necessário. Através do microcomputador, com terminal de vídeo e impressora disponível, registros de

dados podem ser efetuados a todo instante, conforme Metzger (1980), Puzzi (1986) e Gonçalves (1992).

### 4.3 Características dos silos

Existem vários tipos de silos, como por exemplo os silos verticais, horizontais, com condução por coluna, com fundos falsos perfurados, com sistemas de aeração direta por insuflação ou sucção, outros com sistema de dutos centrais e bifurcações etc.

Cada silo se destina a uma finalidade, logo, suas características são diferentes. Ao se projetar um silo, os itens principais que influenciarão na sua eficiência são: o tipo de grão que será armazenado, as dimensões do silo (altura e seção da célula) que determinam a capacidade de armazenamento, a vazão específica recomendada, a perda de carga a ser vencida e o ventilador a ser usado.

Cada tipo de grão possui suas características próprias, tais como: umidade de armazenamento; coeficiente de compactação; porosidade; modo de respiração e peso específico, os quais contribuem oferecendo resistência a passagem do ar durante a aeração, o que faz elevar a perda de carga e definir qual a vazão específica a ser utilizada.

A vazão específica, expressa em  $\text{m}^3$  de ar, por hora e por  $\text{m}^3$  de grão, é uma das grandezas mais importantes no processo da aeração. Elas são tabeladas e recomendadas dependendo do tipo de grão e da finalidade da aeração. Por exemplo: as vazões a serem aplicadas às células destinadas à seca-aeração (“dryaeration”) do milho são de 30 a 60  $\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^3$ . Já as células destinadas ao armazenamento, em conformidade com as normas comerciais (13 a 15% de umidade), com aeração de manutenção, deverão ser equipadas para uma vazão específica mínima de 10  $\text{m}^3/\text{h}\cdot\text{m}^3$ , como relata Lasseran (1981). As vazões

específicas recomendadas à aeração de manutenção devem ser suficientemente baixas, evitando-se a secagem ou reumidecimento excessivo do produto. O potencial de secagem do ar ambiente é praticamente todo utilizado durante o período em que a frente de aeração progride pelo produto, quando as vazões específicas são reduzidas, fazendo com que não seja removido mais que um ponto percentual da umidade contida no grão, segundo Burrell (1973) e De Beer (1972).

Uma vez definida a vazão específica a ser utilizada, deve-se determinar a pressão que deverá ser insuflada. Esta é igual à perda de carga total da instalação, expressa em pascal (pa) ou milímetros de coluna de água (mmca), e corresponde à soma das perdas de cargas individuais de cada elemento do circuito de ar. Estas são perdas de carga devido ao sistema de distribuição do ar (mudança de seção, curvas, bifurcações etc.); perda de carga devido ao tipo de grão e as perdas devido ao sistema de difusão (por fundo falso, duto central ou duto horizontal).

Determinada a perda de carga total a ser vencida, deve-se dimensionar o ventilador para esta finalidade. Estes são escolhidos através de catálogos dos fabricantes, os quais apresentam todas as características desejadas, em vazão de ar e pressão.

Uma vez alteradas as características de um silo, uma nova vazão específica será recomendada, a perda de carga total deverá ser recalculada e um novo ventilador deverá ser dimensionado para atender as necessidades do silo e obter um sistema de aeração eficiente.

#### 4.4 Tempo de resfriamento de uma célula de grãos

Quando o ar frio é forçado através da massa de grãos forma-se uma *zona de resfriamento*. Esta zona é formada, inicialmente, na camada de grãos próxima do local da tomada de ar. Com o prosseguimento da aeração, a zona move-se na direção do fluxo de ar, resfriando sucessivamente as camadas seguintes, as quais esfriam depois de um determinado tempo, até atingir a última camada. Na frente da zona de resfriamento os grãos permanecem com a temperatura inicial. É necessário movimentar a zona de resfriamento através de toda a massa de grãos ensilada. A interrupção da aeração, com a zona de resfriamento ainda no interior da massa de grãos, geram desníveis de temperatura, entre diferentes pontos, podendo ser altamente prejudicial para o produto aerado. Um dos principais objetivos da aeração é homogeneizar a temperatura da massa de grãos, evitando a migração de umidade. Na Figura 3, apresenta-se o esquema de um silo vertical com a progressão da zona de resfriamento.

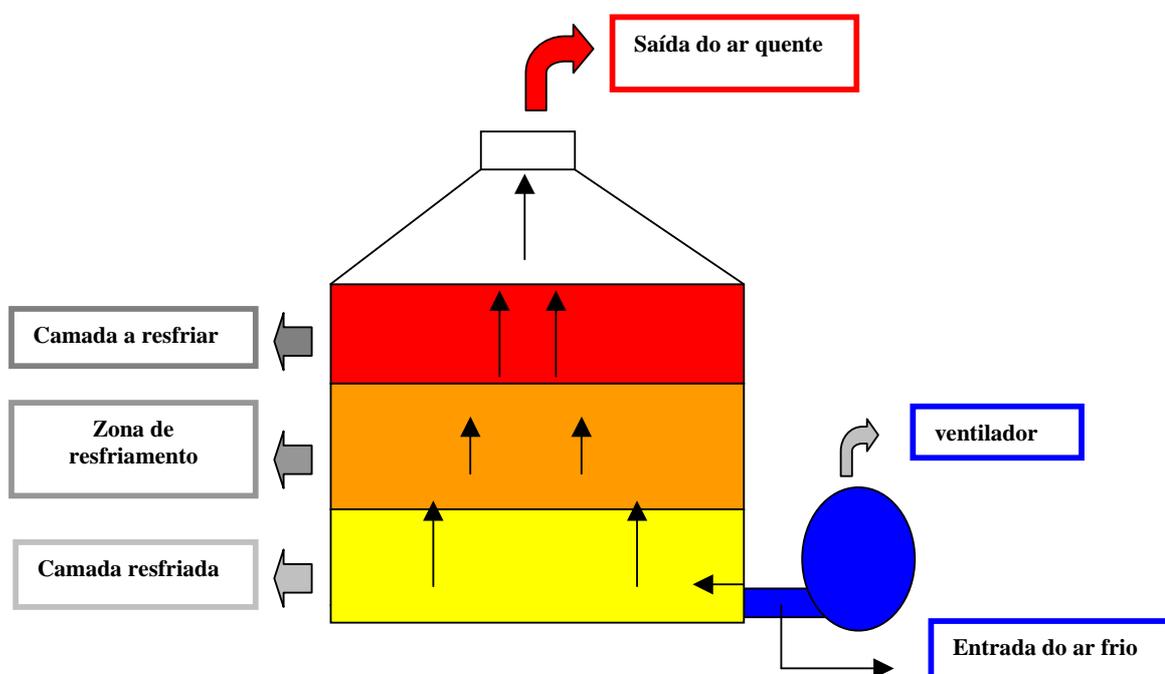


Figura 3. Propagação da zona de resfriamento

No início do processo, observa-se que há um aquecimento nas últimas camadas. Isso se deve ao fato do grão desprender calor e o aumento de temperatura ser rápido. Este fenômeno é perigoso, podendo causar às últimas camadas conseqüências desastrosas como desenvolvimento de fungos, perda de qualidade do produto, aglomeração, degradação, do poder germinativo etc. Resultados mostram que a velocidade de progressão da zona de resfriamento deve ser tal que a última camada de grãos deve ser atingida pelo resfriamento antes de ser aquecida.

O tempo necessário para resfriar completamente uma massa de grãos, o qual é inversamente proporcional à velocidade de propagação da zona de resfriamento ( $v_g$ ) e diretamente proporcional à altura da massa de grãos ( $H$ ), é de fundamental importância para se fazer uma boa aeração.

Segundo Lasseran (1981), o tempo ( $t_H$ ) necessário para a zona de transição efetuar o percurso de uma certa altura ( $H$ ) da massa de grãos a ventilar é dada pela expressão:

$$t_H = \frac{H}{v_g} \quad (1)$$

A velocidade de propagação da zona de resfriamento ( $v_g$ ) é função, principalmente, da velocidade do ar ( $v_a$ ), a qual é diretamente proporcional à vazão ( $Q$ ) fornecida pelo ventilador. Essas velocidades são dadas pelas equações:

$$v_a = \frac{Q}{S} \quad (2)$$

$$v_g = v_a \frac{r_a c_a}{r_g c_g}, \quad (3)$$

onde:

- $v_a$  : velocidade do ar (m/h);
- $v_g$  : velocidade da zona de resfriamento (m/h);
- $Q$  : vazão total (m<sup>3</sup>/h);
- $S$  : seção da célula (m<sup>2</sup>);
- $r_a$  : massa específica do ar (kg/m<sup>3</sup>);
- $r_g$  : massa específica do grão (kg/m<sup>3</sup>);
- $c_a$  : calor específico do ar (kJ/kg, °C);
- $c_g$  : calor específico do grão (kJ/kg, °C).

Lasseran (1981) afirma que, experimentalmente, foi demonstrado que o tempo necessário para o resfriamento completo da célula, também conhecido como tempo de aeração ( $t_{aer}$ ), é igual a três vezes o tempo ( $t_H$ ) acima citado. Puzzi (1986) também recomenda esta fórmula de cálculo, porém afirma que é um tempo provável de aeração. Desta forma, pode ser proposta a seguinte fórmula de cálculo:

$$t_{aer} = 3t_H = 3 \cdot \frac{H}{v_g}, \quad (4)$$

onde:

- $t_{aer}$  : tempo de resfriamento completo ou tempo de aeração (h);
- $H$  : altura da massa de grãos a ventilar (m);
- $v_g$  : velocidade de propagação da zona de resfriamento (m/h).

#### 4.5 Consumo de energia elétrica por período de aeração

O consumo de energia elétrica, nos dias atuais, vem se tornando uma das grandes preocupações em todos os setores de produção. Os gastos com energia elétrica estão na pauta de discussão de todo produtor, em função dos preços das tarifas cobradas pelas concessionárias e de toda a política energética do país. Reduzir custos, reduzindo o consumo de energia é, talvez, a grande opção para que um processo de aeração em silos se torne rentável ao produtor, uma vez que ele é indispensável.

As resistências opostas ao deslocamento do ar podem ser classificadas em três grandes grupos: devidas à distribuição do ar, ao próprio grão e ao dispositivo de difusão do ar no grão.

É necessário que o ar possua uma certa pressão, para poder atravessar a massa de grãos com a vazão desejada. Esta pressão pode ser calculada e depende dos seguintes fatores: natureza do grão, peso específico, velocidade do ar e espessura do grão.

Segundo Lasseran (1981), a perda de carga ocasionada pelo escoamento do ar no meio do grão ( $\Delta p_g$ ) depende muito da natureza do grão: dimensão, forma

e porosidade do meio. Para considerar as perdas de carga na rede de distribuição (canalização + dutos), aumenta-se ( $\Delta p_g$ ) de 20% (admitindo-se, implicitamente, que a instalação tenha sido corretamente dimensionada), obtendo-se, desse modo, a pressão estática fornecida pelo ventilador. Para obter a pressão total ( $\Delta p$ ), aplica-se uma nova majoração de 15% (pressupõe-se que a pressão dinâmica seja igual a 15% da pressão estática). Assim, a pressão total é dada pela expressão:

$$\Delta p = 1,40 \Delta p_g = 1,40 H \left( k_1 v_a + k_2 v_a^2 \right), \quad (5)$$

onde:

- $H$  : altura da massa de grãos (m);
- $\Delta p_g$ : perda de carga no meio do grão (mmca);
- $v_a$  : velocidade do ar (cm/s);
- $k_1$  : coeficiente dependendo da natureza do grão  $\left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (\text{cm/s})^{-1} \right)$ ;
- $k_2$  : coeficiente dependendo da natureza do grão  $\left( \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot (\text{cm/s})^{-2} \right)$ .

A potência absorvida pelo ventilador é dada pela seguinte expressão:

$$P_v = \frac{0,98 \Delta p Q}{\eta}, \quad (6)$$

na qual:

- $P_v$  : potência elétrica absorvida pelo ventilador (kW);
- $\Delta p$  : pressão total fornecida pelo ventilador (mmca);
- $Q$  : vazão total de ar (m<sup>3</sup>/h);
- $\eta$  : rendimento do ventilador (%).

Segundo Lasseran (1981), considerando o peso específico médio de 0,8 t/m<sup>3</sup> obtido após compactação da massa de grãos dentro da célula, a potência elétrica absorvida da rede é dada por:

$$P_e = \frac{P_v}{0,8}, \quad (7)$$

onde:

- $P_e$  : potência absorvida da rede (kW);
- $P_v$  : potência absorvida pelo ventilador (kW).

A energia elétrica consumida é calculada através da fórmula:

$$W_e = P_e \cdot t_{aer}, \quad (8)$$

onde:

- $W_e$  : energia elétrica consumida (kWh);
- $P_e$  : potência absorvida na rede (kW);
- $t_{aer}$  : tempo de aeração (h).

#### 4.6 Análise da redução do consumo de energia elétrica em função das características de operação do ventilador

Os ventiladores utilizados nos processos de aeração são do tipo centrífugo. Historicamente, estes ventiladores têm sido acionados por motores de indução e operam com velocidade praticamente constante. Observando-se as leis de proporcionalidade dos ventiladores centrífugos, ainda que teóricas, estas podem ser aplicadas com precisão suficiente às condições reais, quando a densidade do ar é considerada constante. Segundo Doll (1989) estas leis mostram que a vazão é diretamente proporcional à velocidade no eixo do ventilador, a pressão varia com o quadrado da velocidade e a potência desenvolvida varia com o cubo da velocidade, isto é:

$$Q_2 = Q_1 \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (9)$$

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \quad (10)$$

$$P_2 = P_1 \left( \frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^3 \quad (11)$$

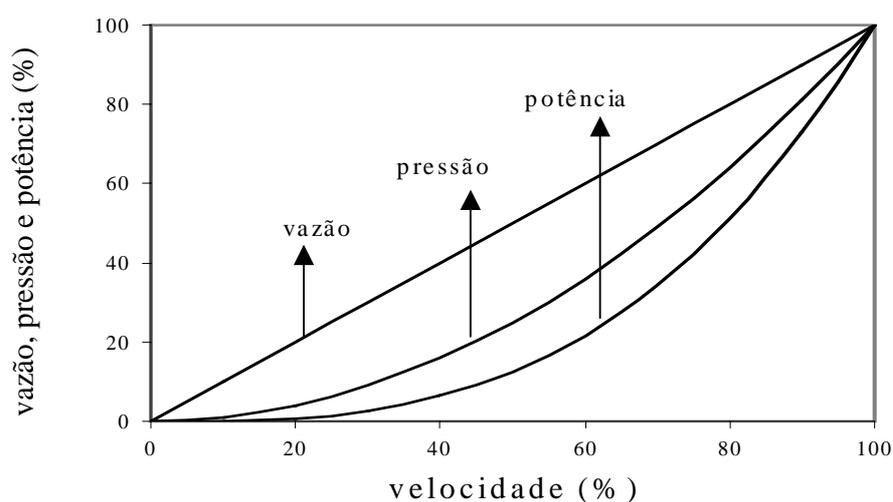
Nestas expressões, tem-se:

- $Q$  : vazão total (m<sup>3</sup>/h);
- $\Delta p$  : pressão total (mmca);
- $P$  : potência desenvolvida ( kW);

- $\omega_1$  : ponto de operação de velocidade do eixo do ventilador ( rpm );
- $\omega_2$  : ponto de operação de velocidade do eixo do ventilador ( rpm ).

Existem várias formas para reduzir a vazão. Uma das mais utilizadas é aquela em que, por intermédio de um registro de saída provoca o estrangulamento, reduzindo a vazão. Este método, apesar de reduzir a vazão, não proporciona uma redução razoável na potência desenvolvida, uma vez que a velocidade do motor e, portanto, do ventilador, permanecem praticamente constantes. Na realidade, este método altera a curva do sistema e não a do ventilador.

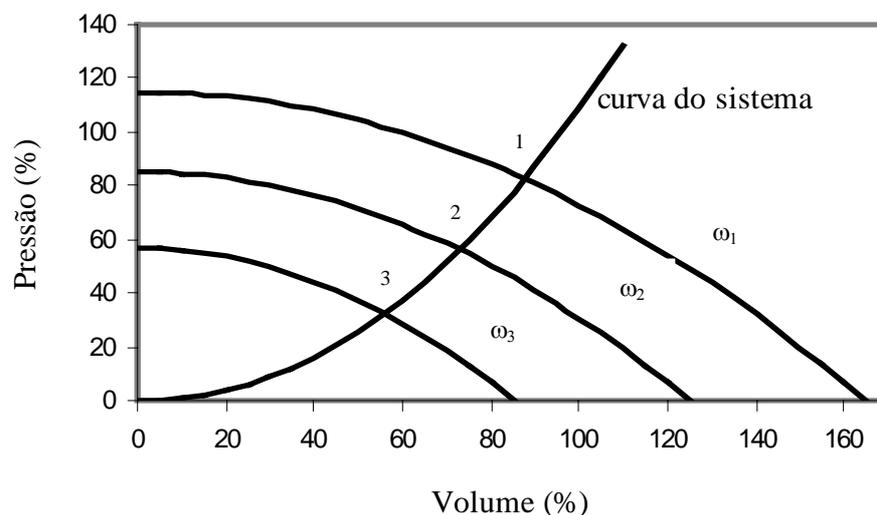
Observa-se na Figura 4 que, para obter uma grande redução na potência desenvolvida, em função da redução da vazão e da pressão, é necessário reduzir razoavelmente a velocidade do motor.



**Figura 4. Comportamento das grandezas características de um ventilador centrífugo em função da velocidade do motor**

De acordo com estas leis, verifica-se um grande potencial de economia de energia elétrica, quando o sistema permite a operação com vazão reduzida.

Na Figura 5, pode-se observar o comportamento da característica *pressão x vazão* de um ventilador centrífugo quando se utiliza a redução da velocidade para diminuir a vazão. Neste caso, a curva do sistema permanece inalterada e obtém-se uma família de curvas para o ventilador. Com a diminuição da velocidade, o ponto de operação do sistema se altera. Para uma velocidade  $\omega_2$  (ponto 2) menor que  $\omega_1$ , obtém-se uma redução de vazão e pressão. Como a potência desenvolvida é proporcional ao produto da pressão pela vazão e estas grandezas têm suas proporcionalidades com a velocidade de acordo com as equações (9) a (11), fica caracterizado o potencial de economia de energia.



**Figura 5. Comportamento do ventilador e do sistema**

Atualmente, é possível operar os motores de indução com velocidade variável, através da utilização dos conversores de frequência. Estes conversores têm a característica de fornecer tensão e frequência variáveis, a partir de uma fonte de alimentação com tensão e frequência constantes, segundo Andreas (1992). Um motor de indução com rotor em gaiola opera, normalmente, com velocidade praticamente constante e com um valor um pouco abaixo ao da velocidade síncrona, da ordem de 5%, ou seja:

$$\omega_s = \frac{120 \cdot f}{p}, \quad (12)$$

onde:

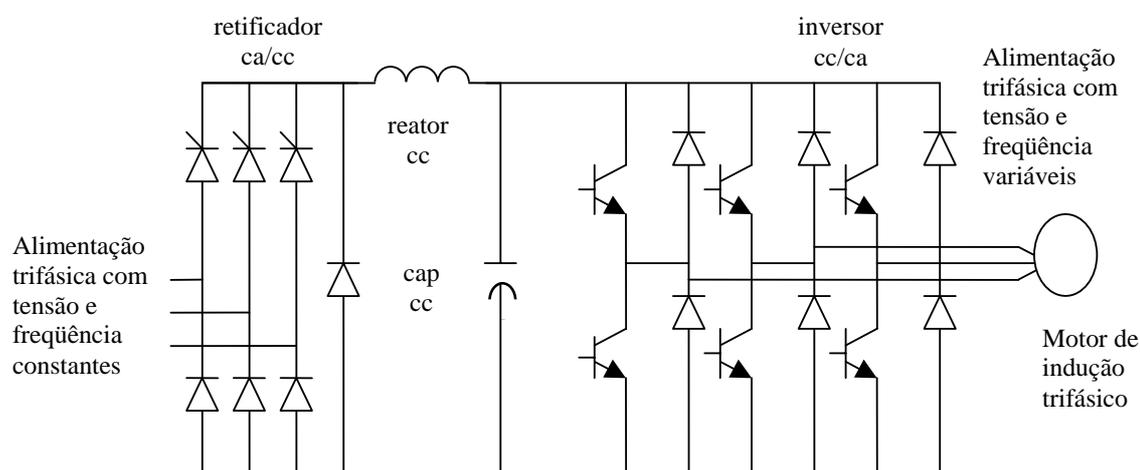
- $\omega_s$  : velocidade síncrona (rpm);
- $f$  : frequência (Hz);
- $p$  : número de pólos.

Este motor pode operar de forma eficiente com outros valores de velocidade se a frequência da fonte de alimentação puder ser ajustada. O Quadro 1 mostra os valores da velocidade síncrona em função da frequência para um motor de 4 pólos.

Quadro 1. Velocidade síncrona em função da frequência para um motor de 4 pólos.

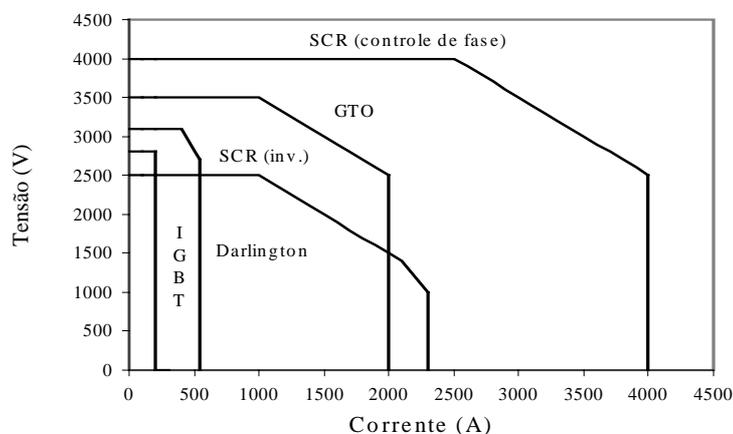
Frequência $f$ (Hz)	Velocidade síncrona $\omega_s$ (rpm)
120	3600
90	2700
60	1800
30	900
15	450

Os conversores de frequência utilizam a tecnologia dos semicondutores de potência para fornecer uma fonte de tensão com frequência variável. Estes conversores são compostos por duas partes: a parte de retificação, que converte uma potência “ca” com frequência fixa em potência “cc”, e uma parte de inversão, que converte uma potência “cc” em potência “ca” com frequência variável. Na Figura 6, apresenta-se um diagrama esquemático deste conversor.



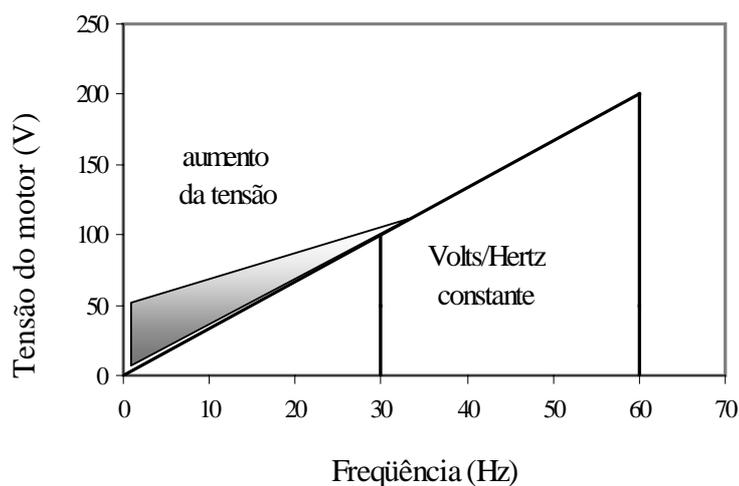
**Figura 6. Diagrama esquemático de um conversor de frequência**

Segundo Andreas (1992), os tipos e tamanhos dos semicondutores de potência utilizados nestes conversores dependem dos níveis de tensão e de potência desejados. A Figura 7 ilustra o comportamento de vários dispositivos semicondutores. Os tipos de dispositivos semicondutores usados nos diversos tipos de inversores são especificados em função da qualidade, capacidade e custo.



**Figura 7. Comparação das grandezas nominais de vários dispositivos semicondutores de potência**

Os motores de indução trifásicos podem ser utilizados em aplicações de velocidade variável quando o motor for alimentado por uma fonte de tensão e frequência variáveis (inversor). A tensão de entrada no motor é variada proporcionalmente à sua frequência, isto é, a relação *Volts/Hertz* é mantida constante. A Figura 8 mostra este comportamento.



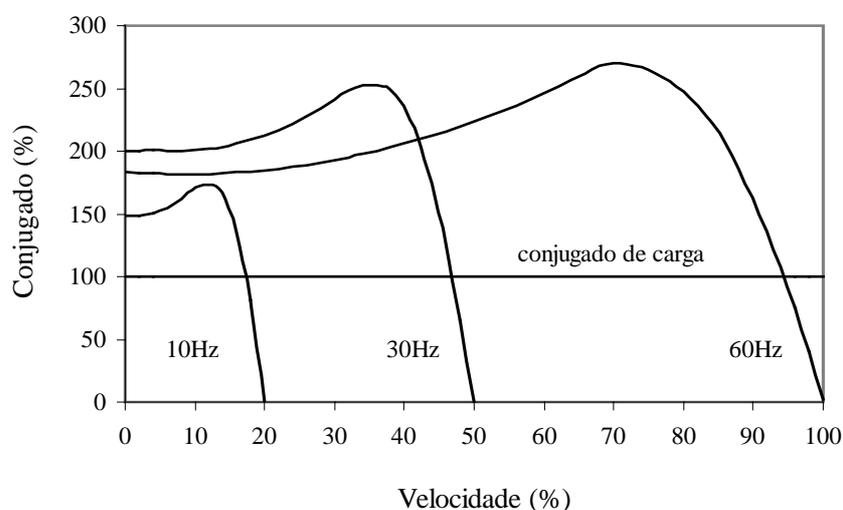
**Figura 8. Relação Volts/Hertz**

Os inversores utilizados atualmente usam a técnica PWM (Pulse Width Modulation), que faz a variação da tensão e da frequência, através da modulação das larguras dos pulsos dos dispositivos semicondutores de potência, tais como os transistores e IGBTs. Através da seleção adequada da largura e do espaçamento dos pulsos, pode-se atenuar ou até mesmo eliminar alguns componentes harmônicos da forma de onda da tensão.

Existem muitas variações na configuração dos inversores para obtenção de frequência variável, mas o princípio de operação é, essencialmente, o mesmo. Como qualquer equipamento, as alterações e melhorias destes inversores acontecem todos os dias. As melhorias vêm, principalmente, do aumento do uso de circuitos integrados e microprocessadores, os quais têm reduzido o número de componentes do controle lógico. A utilização de componentes de potência, tais como IGBTs, transistores e GTOs, tem reduzido o custo do circuito de potência. Estes fatores, mais o desenvolvimento na área de projeto e tecnologia, têm reduzido e continuarão a reduzir o tamanho e custo dos inversores, ao mesmo tempo em que o desempenho e a confiabilidade continuarão a aumentar.

#### **4.7 Características dos motores de indução operando com frequência variável**

O motor de indução trifásico tem uma única curva *conjugadoxvelocidade* para cada frequência quando opera com a relação *Volts/Hertz* constante. Esta família de curvas é ilustrada na Figura 9.



**Figura 9. Curva do conjugado em função da velocidade do motor para vários valores da frequência, com a relação Volts/Hertz constante**

A utilização da capacidade de conjugado do motor depende da restrição de corrente imposta pelo inversor. Em muitos casos, o inversor pode operar com uma corrente igual a 150% de sua corrente nominal, por um tempo de 1 minuto.

Os requisitos de conjugados de partida e de aceleração dependem do tipo de carga e de seu momento de inércia. Para muitas bombas e ventiladores, estes requisitos normalmente não geram problemas. Entretanto, para grandes ventiladores e outros tipos de carga com alto momento de inércia, o tempo de aceleração da carga torna-se importante devido ao aquecimento dos enrolamentos do estator.

O conjugado de aceleração é igual à diferença entre os conjugados desenvolvido pelo motor e o de carga. O conjugado desenvolvido pelo motor disponível é uma função das limitações de tensão e corrente, imposta pelo inversor ao motor. Portanto, a combinação do motor e do inversor deve ser selecionada de tal forma que a carga possa ser

acelerada sem comprometer a capacidade de corrente da alimentação e o tempo de aceleração requerido para a aplicação.

#### **4.8 Conjuntos e Lógica Fuzzy: Fundamentos**

Segundo Feitosa (1992), na década de sessenta, mais precisamente em 1965, o professor Zadeh, da Universidade de Berkeley, USA, que, na época, trabalhava com Inteligência Artificial, achava que a teoria usual de conjuntos era por demais rígida para contemplar fenômenos quotidianos do dia a dia. Uma vez que os sistemas especializados, os quais estava interessado em implementar, eram *softwares* interativos, capazes de tomar algumas decisões próprias, sustentados apenas pela teoria usual de conjuntos, a qual admite apenas decisões binárias, ou seja, o “verdadeiro” e o “falso”, não seria possível interpretá-los satisfatoriamente, abrangendo toda a gama de decisões da mente humana para interpretar estes fenômenos.

Foi então que, neste período, Zadeh sugeriu uma teoria alternativa de conjuntos, teoria essa muito mais flexível, para atender suas necessidades. Uma teoria onde a passagem da pertinência para a não pertinência fosse feita de uma forma lenta e gradual e não abrupta, como na teoria usual de conjuntos. Dessa maneira, surgiram os Conjuntos Fuzzy; a palavra “fuzzy” pode ser traduzida por “nebulosa”.

Com os estudos realizados sobre os conjuntos fuzzy, surgia a possibilidade de interpretar os fenômenos não quantitativos e vagos, porém, surgia também a necessidade de dar a esta teoria uma estrutura matemática completa e consistente. Como os sistemas lógicos estão intimamente relacionados com a teoria de conjuntos, Zadeh vislumbrou a possibilidade da construção de uma lógica, capaz de adequar os conjuntos fuzzy aos

“padrões” dos sistemas lógicos já consagrados. A esse novo sistema, ele denominou de “Lógica Fuzzy”.

Com o surgimento da Lógica Fuzzy, significativos resultados foram aparecendo e despertando o interesse de outros campos de estudos, principalmente aqueles que desenvolvem tecnologia elétrica, eletrônica e computacional. Esses conceitos fuzzy têm contribuído, acentuadamente, para o desenvolvimento de áreas como a teoria de controle e análises de decisão, entre outras.

Devido à sua grande aplicabilidade nestas áreas, vislumbra-se a possibilidade de aplicá-la neste trabalho. Para tanto, algumas definições, usadas por Zadeh (1987), são necessárias para melhor compreensão do que segue. É conveniente salientar que serão apresentadas apenas algumas idéias básicas da Lógica Fuzzy.

Na Lógica Clássica, o valor verdade de uma proposição assumirá, somente, o valor falso (0) ou o valor verdadeiro (1) e, necessariamente, terá que assumir um desses dois, não havendo outra possibilidade. Já na Lógica Fuzzy, o valor verdade de uma proposição pode ser um subconjunto fuzzy de qualquer conjunto parcialmente ordenado. Geralmente é adotado o intervalo fechado de números reais  $[0,1]$ . Assim, na Lógica Fuzzy não existem apenas o verdadeiro (1) e falso (0), mas uma infinidade de valores verdades, os quais são expressões lingüísticas interpretadas como subconjuntos fuzzy do intervalo unitário. Por exemplo: falso, muito falso, um pouco falso, mais ou menos falso, pouco verdadeiro, muito verdadeiro, verdadeiro etc.

Na Lógica Clássica, os predicados são termos exatos tais como: igual a, maior que, ímpar, primo etc. Na Lógica Fuzzy, os predicados são termos subjetivos ou “nebulosos”, como: magro, alto, úmido, quente, velho etc. Outro aspecto em que diferem as

duas lógicas é quanto aos quantificadores. Na Lógica Clássica existem apenas os quantificadores universal ( $\forall$ ) e o existencial ( $\exists$ ); na lógica fuzzy, uma variedade de quantificadores, além do existencial e do universal, são usados freqüentemente, como: pouco, muito, muito pouco, perto de, vários, geralmente, em torno de, provavelmente etc. Dessa forma, pode-se ter uma pequena visão da flexibilidade da Lógica Fuzzy.

Conforme Cruz (1996) e Feitosa (1992), a idéia de Zadeh se torna interessante, na medida em que associa a cada elemento de um conjunto um certo número real do intervalo  $[0,1]$ . Cada conjunto corresponde a um predicado lógico e os elementos do conjunto aos objetos que satisfazem o predicado. Pode-se dizer que esse número é o grau de verdade do objeto satisfazendo o predicado. Daí a definição de um conjunto fuzzy.

**Definição:** Seja  $V \neq \emptyset$ . Um conjunto fuzzy  $A$  é uma função  $f_A: V \rightarrow [0,1]$ , onde o conjunto  $V$  é chamado o universo de  $A$ , com  $A \subseteq V \times [0,1]$ .

Na definição anterior,  $[0,1]$  é o intervalo de números reais e  $f_A$  é denominado o conjunto verdade de  $A$ . Dessa forma definido, pode-se identificar o conjunto fuzzy  $A$  com a função  $f_A$ , ou seja,  $A \equiv f_A$ .

Por exemplo: Seja  $V = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ . Então um conjunto fuzzy  $A$  poderia ser do tipo:  $A = \{(x_1, 0,3), (x_2, 0,7), (x_4, 0,1)\}$ . É conveniente observar que, cada elemento do conjunto fuzzy  $A$  possui um valor verdade em  $[0,1]$  e que  $A$  é formado por pares ordenados, uma vez que  $A \subseteq V \times [0,1]$ . Assim, o valor verdade, também chamado de “grau de aderência” ou “grau de pertinência”, do elemento  $x_1$  é 0,3, ou seja,  $f_A(x_1) = 0,3$ . Por convenção,

os elementos que tiverem grau de aderência (valor verdade) igual a zero não precisam ser representados no conjunto, que é o caso do elemento  $x_3$ , ou seja,  $f_A(x_3)=0$ , ou, ainda,  $(x_3,0) \in A$ . Também por convenção, todos os elementos do conjunto universo  $V$  possuem grau de aderência igual a 1, grau este que não precisa ser representado.

Outras definições da Lógica Fuzzy se fazem necessárias para melhor compreensão do que segue.

Sejam  $V$ , o conjunto universo, e dois conjuntos fuzzy  $A = \{(x, f_A(x)), \forall x \in V\}$  e  $B = \{(x, f_B(x)), \forall x \in V\}$ . Então:

- i) Igualdade de conjuntos:  $A = B \Leftrightarrow f_A(x) = f_B(x), \forall x \in V$ .
- ii) Conjunto Vazio:  $A = \emptyset \Leftrightarrow f_A(x) = 0, \forall x \in V$ .
- iii) Conjunto Universo:  $A = V \Leftrightarrow f_A(x) = 1, \forall x \in V$ .
- iv) União de conjuntos:  $A \cup B = \{(x, \max[f_A(x), f_B(x)]), \forall x \in V\}$ . Utiliza-se a notação:  $\max[f_A(x), f_B(x)] = f_A \vee f_B$ , onde “ $\vee$ ” é o conectivo “ou”.
- v) Intersecção de conjuntos:  $A \cap B = \{(x, \min[f_A(x), f_B(x)]), \forall x \in V\}$ . Utiliza-se a notação:  $\min[f_A(x), f_B(x)] = f_A \wedge f_B$ , onde “ $\wedge$ ” é o conectivo “e”.
- vi) Conjunto Complementar: denotado por  $\neg A$ :  $f_{\neg A}(x) = 1 - f_A(x), \forall x \in V$ , onde “ $\neg$ ” é o conectivo “não”, ou seja, a negação.

É interessante notar que, para a linguagem fuzzy, são usados os conectivos:  $\wedge$  (e);  $\vee$  (ou);  $\neg$  (negação) e  $\rightarrow$  (se...então). O  $\wedge$  modelado pelo mínimo, o  $\vee$  pelo máximo,  $\neg$  pelo complementar, isto é, negar uma frase  $A$  de valor lógico (grau de aderência)

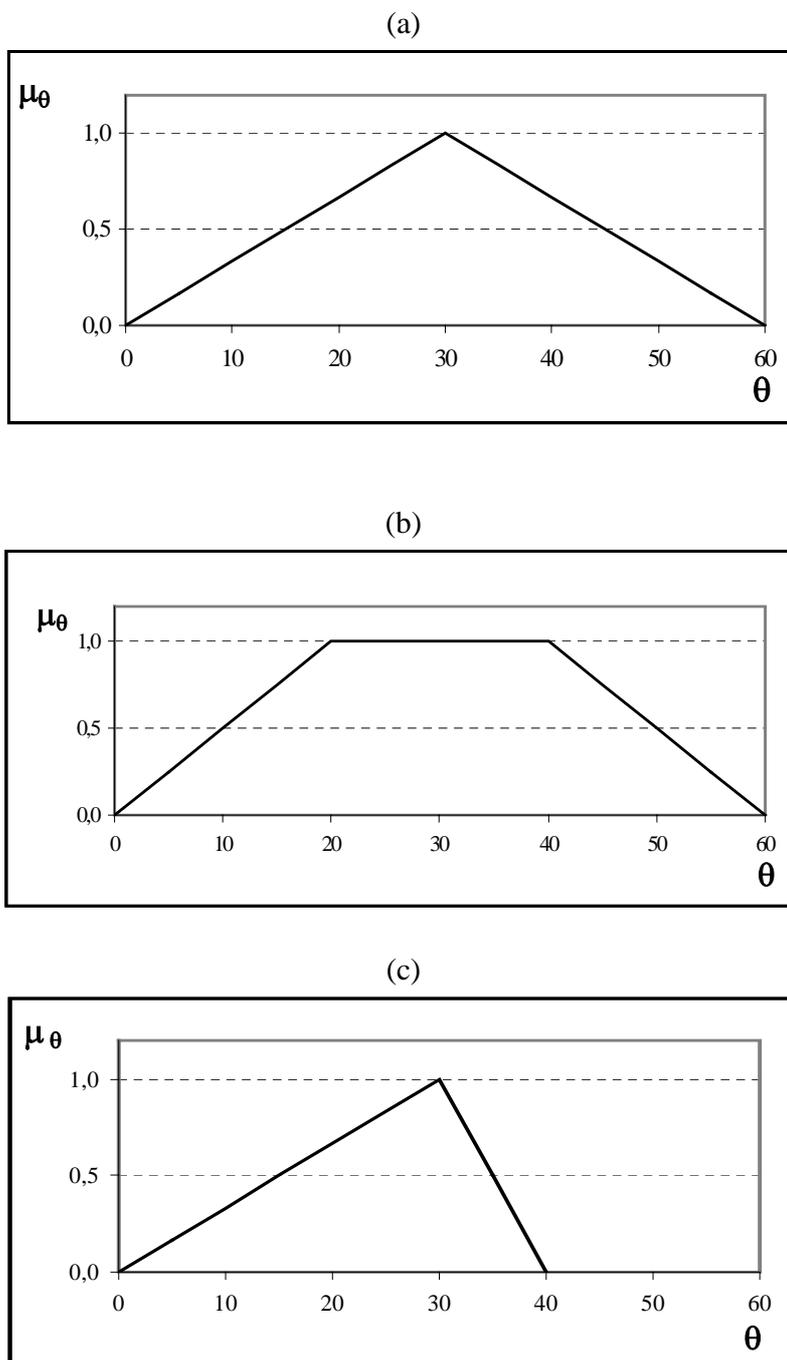
$f_A(x)$  é tomar o seu complementar  $\neg A$ , de valor lógico  $f_{\neg A}(x) = 1 - f_A(x)$ . Já o conectivo  $\rightarrow$ , chamado de implicação, é modelado por:  $a \rightarrow b = 1 \wedge (1 - a + b)$ . Dessa forma, uma sentença fuzzy pode admitir outros valores verdade e não somente falsa (0) ou verdadeira (1).

Na Lógica Clássica, um elemento ou pertence a um conjunto ou não.

Dado um conjunto universo  $U$  e um elemento  $x \in U$ , o grau de pertinência  $f_A(x)$ , o qual, de agora em diante, denota-se por  $\mu_A(x)$ , com respeito a um conjunto  $A \subseteq U$ , é dado pela função  $\mu_A(x): U \rightarrow [0,1]$ , chamada de função característica, definida por:

$$\mu_A(x) = \begin{cases} 1 & \text{se } x \in A \\ 0 & \text{se } x \notin A \end{cases} \quad (13)$$

Zadeh (1987) propôs uma caracterização mais ampla, fazendo com que a passagem da pertinência para a não pertinência fosse mais lenta e gradual, na medida em que sugere que alguns elementos são mais membros de um conjunto do que outros. O fator de pertinência pode, então, assumir qualquer valor entre 0 e 1, sendo que o valor (0) indica uma completa exclusão e o valor (1) representa a completa pertinência ou inclusão. Esta generalização aumenta o poder da função característica. Por exemplo, para expressar a idéia de que uma temperatura ( $\theta$ ) tem seu valor perto de  $30^\circ\text{C}$ , pode-se utilizar uma função de pertinência triangular ilustrada na Figura 10a, onde os valores maiores e menores que  $30^\circ\text{C}$  são distribuídos simetricamente, com máximo grau de pertinência em  $30^\circ\text{C}$ , para sugerir a idéia de que quanto mais perto a temperatura de  $30^\circ\text{C}$ , mais ele se identifica com o conceito representado.

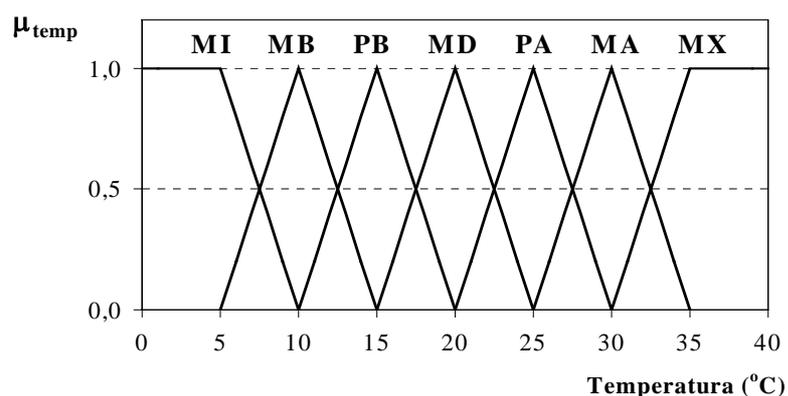


**Figura 10. Função de pertinência a, b e c**

Um outro fenômeno poderia ser caracterizado pela função trapezoidal ilustrada na Figura 10b, a qual expressa a necessidade de qualquer temperatura entre 20 e 40°C

ter a mesma importância que a temperatura central de 30°C. Se a necessidade é fazer com que os valores menores que 30°C tenham pertinência maior dentro do conjunto e restringir este fato aos valores maiores, pode ser usada uma outra função triangular, ilustrada na Figura 10c, a qual vem ao encontro do que se deseja representar.

Conceitos são, de uma forma geral, expressos por elementos qualitativos, como: “muito”, “não muito”, “mais ou menos”, “pouco quente”, “um tanto baixo”, ao invés de valores quantitativos. Esses elementos qualitativos são resgatados através de variáveis lingüísticas, as quais assumem valores dentro de um conjunto de termos lingüísticos, ou seja, palavras e frases, ao invés de assumirem valores numéricos. Por exemplo, a variável lingüística “temperatura” poderia assumir valores no conjunto {mínima (MI), muito baixa (MB), pouco baixa (PB), média (MD), pouco alta (PA), muito alta (MA), máxima (MX)}. Para se atribuir um significado aos termos lingüísticos, associa-se a cada um deles um conjunto fuzzy definido sobre um universo de discurso comum conforme a Figura 11.



**Figura 11. Variável lingüística temperatura**

Dessa forma, pode-se observar que os conjuntos fuzzy resgatam o significado das variáveis lingüísticas de maneira mais precisa, ou seja, são tratadas no nosso discurso cotidiano. Note-se, também, que os elementos de cada conjunto fuzzy passam da pertinência para a não pertinência de forma lenta e gradual, como sugeriu Zadeh (1987).

#### **4.9 Teoria Fuzzy: Aplicabilidade**

Zadeh (1987), criador da Teoria Fuzzy, demonstra em seus trabalhos a capacidade de tal teoria interpretar os fenômenos não exatos do nosso dia-a-dia, resgatando-os matematicamente de uma forma mais simples e mais exata do que as teorias matemáticas usuais. Daí sua aplicabilidade. Apesar disso, os matemáticos não consideram a Lógica Fuzzy como uma Lógica Matemática nos padrões atuais, ou seja, ela não é, ainda, uma teoria matemática perfeitamente consistente e completa, uma vez que ela deixa de satisfazer algumas propriedades da Lógica Clássica, principal responsável para ditar a veracidade de uma teoria matemática. Isso, no entanto, não inviabiliza a Teoria Fuzzy como uma teoria matemática perfeitamente aplicada, segundo Cruz (1996).

Segundo Bose (1996), desde o desenvolvimento da Teoria Fuzzy, resultados significativos têm surgido em vários campos de estudos e sua aplicabilidade é comprovada em controle de processos, modelagem, estimação, identificação e diagnóstico. Controles fuzzy, já desenvolvidos e utilizados em processos complexos, mostraram uma “performance” superior a outros controles, por exemplo: o Proporcional Integral Derivativo (PID). Este sucesso tem atraído muito campo de trabalho.

Para Barbosa (1995), a aplicação da Teoria Fuzzy no controle de motor cc, facilitou, sensivelmente, o desenvolvimento de tais aparelhos, tornando-os mais precisos, capazes de interpretar com mais exatidão os fenômenos elétricos de um motor.

Conforme Guillemín (1996), os modelos matemáticos fuzzy de um controlador de motor elétrico, são bem mais simples que os modelos atuais como o Proporcional Integral Derivativo (PID), devido à aplicabilidade da Teoria Fuzzy, o que facilita a sua interpretação e implementação.

Especialistas em programação, como Tanaka & Mizumoto (1974), consideram a Teoria Fuzzy, no que diz respeito aos modelos matemáticos, muito mais adequada à programação, sugerindo *softwares* fuzzy de fácil entendimento, capazes de serem usados em várias simulações reais. Estas afirmações são confirmadas por Chang (1974), que também trabalha com interpretação e execução de programas fuzzy, os quais traduzem de maneira mais real as interpretações de fenômenos cotidianos. De uma forma geral, os programas fuzzy são de fácil execução e suas etapas são de fácil compreensão.

## **5 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **5.1 Materiais**

Todos os resultados apresentados neste trabalho foram obtidos através de simulações realizadas no laboratório de pesquisa LAI – Laboratório de Acionamento e Automação Industrial do Departamento de Engenharia Elétrica FET-UNESP/Bauru. Este laboratório possui toda a infra-estrutura necessária de informática, além de um sistema completo de acionamento para motores de indução, alimentado por conversor de frequência do tipo PWM, um sistema de medição totalmente automatizado, através de um sistema de aquisição de dados via computador digital.

Foram utilizados dados reais sobre silos, obtidos em visitas técnicas a várias empresas e catálogos de fabricantes de motores de indução e ventiladores industriais, fornecidos pelas seguintes empresas:

- CEAGESP – Bauru
- CEAGESP – Marília
- CEAGESP – Tupã

- Companhia Cervejaria Brahma – Agudos
- Cervejaria Belco S/A – São Manuel
- Santa Fé Agro-industrial Ltda. – São Manuel
- CARGIL – Bauru
- CARGIL – Lins
- Usina da Barra S/A – Barra Bonita
- Usina Barra Grande – Lençóis Paulista
- Usina Açucareira São Manuel S/A – São Manuel
- Socil – Bauru
- OTAM – Ventiladores Industriais Ltda.
- WEG – Acionamentos Ltda.

## **5.2 Métodos**

### **5.2.1 Modelo fuzzy para obtenção do tempo de aeração**

Utilizando os conceitos da Teoria Fuzzy, descritos anteriormente, apresenta-se o modelo matemático fuzzy para o cálculo do tempo de aeração ( $t_{aer}$ ), o qual dependerá das duas grandezas principais para armazenamento de grãos, que são: a variação de temperatura do grão ( $\Delta\theta$ ), ou seja, a diferença entre a temperatura inicial do grão e a temperatura final de armazenamento desejada, e a umidade do grão ( $U$ ). Outras duas grandezas, fundamentais num processo de aeração, são a temperatura do ar externo e sua umidade relativa, as quais são consideradas implicitamente neste modelo.

Devido à flexibilidade de aplicação desta teoria, conhecendo-se o comportamento do sistema de aeração que envolve, basicamente, o conjunto motor-ventilador, as propriedades do grão e do ar (umidade e temperatura), pode-se compor uma tabela fuzzy de  $\Delta\theta \times U$ . A partir desta tabela e da aplicação das regras fuzzy, determina-se o tempo de aeração necessário para levar a temperatura e a umidade do grão de seus valores iniciais para os valores desejados de armazenamento.

Para o desenvolvimento do modelo, tomou-se como base um silo vertical padrão, com sistema de aeração por insuflação de ar ambiente, destinado ao armazenamento de trigo com padrão de umidade comercial, proveniente do secador com alta temperatura ou armazenado com a temperatura desejada, com as seguintes características:

- Altura da célula – 18 m
- Diâmetro da célula – 6 m
- Capacidade de armazenamento – 380.000 kg
- Peso Específico do trigo – 750 kg/m<sup>3</sup>
- Vazão Específica – 10 m<sup>3</sup>/h·m<sup>3</sup>
- Vazão Total – 5.100 m<sup>3</sup>/h
- Ventilador indicado – OTAM/Centrífugo – modelo TDA-T3R (15cv – 7200 m<sup>3</sup>/h)

Apesar dos valores, o modelo aplica-se a qualquer tipo de silo vertical, bem como a qualquer tipo de grão.

É importante ressaltar que o tempo de aeração aqui determinado é para a condição do motor de indução operando com frequência nominal de 60Hz.

### 5.2.1.1 Determinação dos conjuntos fuzzy

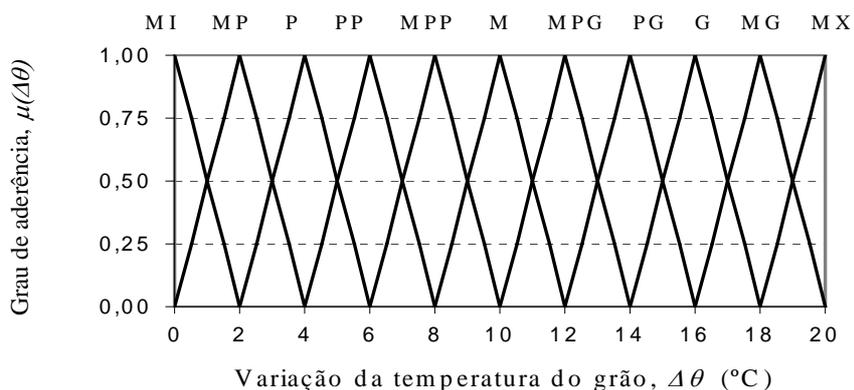
Para a obtenção dos conjuntos fuzzy que representam o comportamento da variação da temperatura ( $\Delta\theta$ ) e da umidade ( $U$ ) é necessário, inicialmente, definir os limites inferior e superior de ( $\Delta\theta$ ) e de ( $U$ ), bem como a amplitude dos intervalos de variação destas duas grandezas. Estes limites e intervalos são obtidos em função do conhecimento prévio do comportamento das grandezas, os quais dependem, principalmente, do tipo de grão que vai ser aerado (milho, soja, trigo etc.), das características do silo (altura e seção das células de armazenamento), do comportamento do seu sistema de aeração (conjunto motor-ventilador, vazão/pressão) e das características do ar externo (temperatura e umidade relativa).

Para a variação da temperatura do grão ( $\Delta\theta$ ), os limites inferior e superior são  $0^\circ$  e  $20^\circ\text{C}$ , em intervalos de  $2^\circ\text{C}$ . Esses limites foram baseados em dados mencionados na literatura (Lasseran, 1981). No Brasil, para regiões frias, as temperaturas de armazenagem estão compreendidas entre  $15^\circ$  e  $20^\circ\text{C}$  e nas regiões quentes, entre  $20^\circ$  e  $25^\circ\text{C}$ . Desta forma, este modelo prevê um aquecimento máximo da massa de grãos de até  $45^\circ\text{C}$ , o qual, pode-se dizer, está superestimado, pois, bem antes da massa de grãos atingir este valor de temperatura, a aeração já deve ser iniciada.

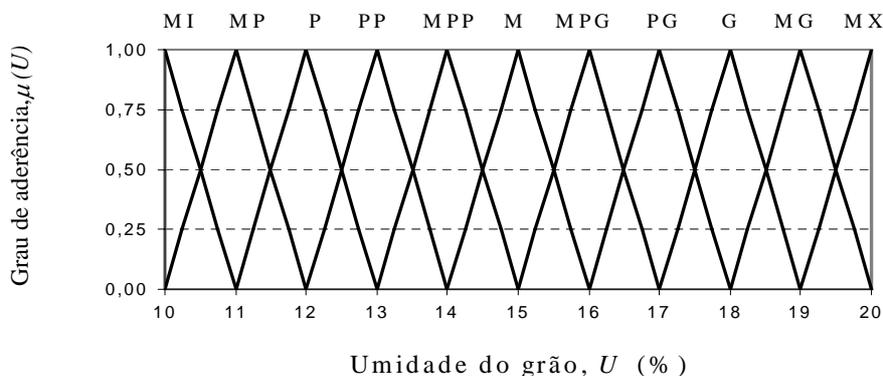
Para a umidade do grão ( $U$ ), os limites inferior e superior são de 10 e 20%, em intervalos de 1%. Da mesma forma, baseando-se nas informações da literatura

citada, a umidade do grão para fins de armazenagem e venda comercial está compreendida entre 13 e 15%. Assim, o modelo também satisfaz além destas necessidades.

As Figuras 12 e 13 descrevem os conjuntos fuzzy adotados para a variação da temperatura e a umidade do grão.



**Figura 12. Conjuntos fuzzy para a variação da temperatura do grão**



**Figura 13. Conjuntos fuzzy para a umidade do grão**

Os nomes e os símbolos dos conjuntos fuzzy adotados nas Figuras 12 e 13 estão descritos no Quadro 2.

Quadro 2. Nomenclatura e símbolo para os conjuntos fuzzy de  $\Delta\theta$  e  $U$ .

Conjuntos fuzzy para $\Delta\theta$ e $U$	Símbolo
Mínima	<b>MI</b>
Muito Pequena	<b>MP</b>
Pequena	<b>P</b>
Pouco Pequena	<b>MP</b>
Muito Pouco Pequena	<b>MPP</b>
Média	<b>M</b>
Muito Pouco Grande	<b>MPG</b>
Pouco Grande	<b>PG</b>
Grande	<b>G</b>
Muito Grande	<b>MG</b>
Máxima	<b>MX</b>

#### 5.2.1.2 Índice de identificação dos conjuntos fuzzy

Os índices  $I$  e  $J$ , que identificam os intervalos numéricos de cada conjunto fuzzy, para  $\Delta\theta$  e  $U$ , representados nas Figuras 12 e 13, respectivamente, são calculados através de um processo de linearização, obtendo-se as seguintes expressões:

$$I = \text{int}\left(\frac{\Delta\theta + 2}{2}\right) \quad (14)$$

$$J = \text{int}(U - 9) \quad (15)$$

#### 5.2.1.3 Grau de aderência

De acordo com a Teoria Fuzzy, cada elemento do conjunto fuzzy possui um grau de aderência ( $\mu$ ), o qual representa o valor verdade (pertinência) do elemento

dentro do conjunto, mostrando o comportamento relativo da grandeza em cada intervalo de variação. O grau de aderência tem variação no intervalo fechado de números reais [0,1].

Pela construção das Figuras 12 e 13, cada elemento ( $\Delta\theta$ ) ou ( $U$ ) pertence a dois conjuntos fuzzy distintos e possui um grau de aderência relativamente a cada um desses conjuntos. Esses graus de aderência serão denotados por ( $\mu$ ) e ( $\mu'$ ), onde ( $\mu'$ ) é chamado de complementar de ( $\mu$ ). O grau de aderência ( $\mu$ ) é determinado através do conjunto fuzzy mais à esquerda do elemento e, conseqüentemente, ( $\mu'$ ) relativamente ao conjunto fuzzy mais à direita.

Os graus de aderência  $\mu(\Delta\theta)$  e  $\mu(U)$ , respectivamente, para cada elemento do conjunto fuzzy mais à esquerda das Figuras 12 e 13, são determinados em função dos índices  $I$  e  $J$  pelas seguintes expressões:

$$\mu(\Delta\theta) = \frac{2I - \Delta\theta}{2} \quad (16)$$

$$\mu(U) = J - U + 10 \quad (17)$$

#### 5.2.1.4 Grau de aderência complementar

Por definição da Teoria Fuzzy, os graus de aderência complementares,  $\mu'(\Delta\theta)$  e  $\mu'(U)$ , são dados por:

$$\mu'(\Delta\theta) = 1 - \mu(\Delta\theta) \quad (18)$$

$$\mu'(U) = 1 - \mu(U) \quad (19)$$

#### 5.2.1.5 Regras fuzzy

Uma vez calculados os graus de aderência  $\mu(\Delta\theta)$  e  $\mu(U)$  e seus respectivos complementares  $\mu'(\Delta\theta)$  e  $\mu'(U)$ , é necessário aplicar as regras fuzzy.

Neste trabalho, utiliza-se a regra da intersecção, a qual é modelada pela função mínimo (*min*), uma vez que o interesse está no “cruzamento” (intersecção) das duas grandezas principais, ou seja, a variação da temperatura do grão ( $\Delta\theta$ ) e a umidade do grão ( $U$ ). Aplicando-se estas regras para a combinação dos graus de aderência, obtêm-se:

$$\mu_{R_1} = \min\{\mu(\Delta\theta); \mu(U)\} \quad (20)$$

$$\mu_{R_2} = \min\{\mu(\Delta\theta); \mu'(U)\} \quad (21)$$

$$\mu_{R_3} = \min\{\mu'(\Delta\theta); \mu(U)\} \quad (22)$$

$$\mu_{R_4} = \min\{\mu'(\Delta\theta); \mu'(U)\} \quad (23)$$

#### 5.2.1.6 Tabela fuzzy

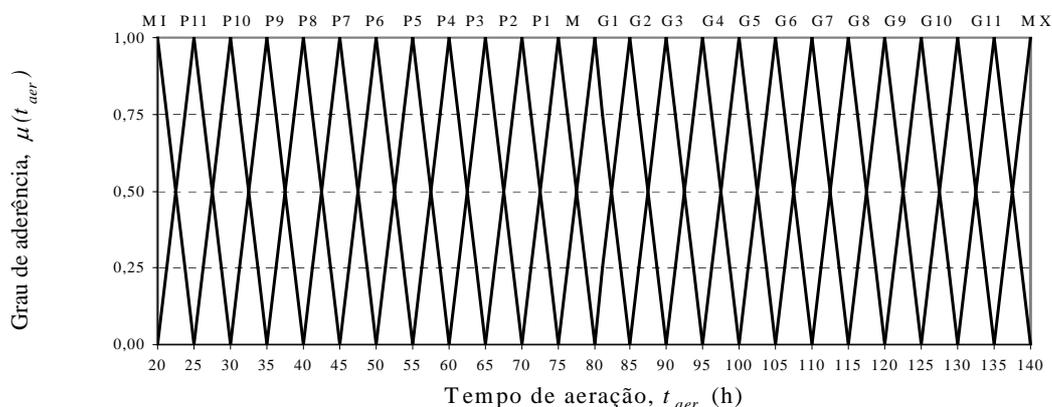
A tabela fuzzy  $\Delta\theta \times U$ , que representa o comportamento do sistema de aeração do silo, é construída analisando-se o tempo de aeração necessário para atingir uma

certa condição desejada de temperatura e umidade do grão, em função das condições iniciais do grão e do ar (temperatura e umidade), das características do sistema de aeração, mais precisamente, o conjunto motor-ventilador (potência, vazão/pressão) e das dimensões da célula de armazenamento (seção e a altura). Assim, qualquer condição desejada poder ser obtida através desta tabela fuzzy, representada no Quadro 3, bastando para tanto, alterar os limites inferior e superior e as amplitudes dos intervalos das Figuras 12, 13 e 14.

Os conjuntos fuzzy, os limites inferior e superior e as amplitudes dos intervalos adotados para o tempo de aeração estão representados na Figura 14. Os nomes e os símbolos dos conjuntos fuzzy adotados para o tempo de aeração estão descritos no Quadro 4.

Quadro 3. Tempo de aeração  $t_{aer}$  em função de  $\Delta\theta$  e  $U$  que representa o comportamento do sistema de aeração.

$\Delta\theta$	MI	MP	P	PP	MPP	M	MPG	PG	G	MG	MX
$U$											
MI	<b>0,0</b>	<b>G1</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P6</b>	<b>P8</b>	<b>P9</b>	<b>P10</b>	<b>MI</b>
MP	<b>0,0</b>	<b>G2</b>	<b>M</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P7</b>	<b>P8</b>	<b>P10</b>	<b>MI</b>
P	<b>0,0</b>	<b>G3</b>	<b>G1</b>	<b>M</b>	<b>P1</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P6</b>	<b>P8</b>	<b>P9</b>	<b>P11</b>
PP	<b>0,0</b>	<b>G4</b>	<b>G2</b>	<b>G1</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P4</b>	<b>P6</b>	<b>P7</b>	<b>P9</b>	<b>P10</b>
MPP	<b>0,0</b>	<b>G5</b>	<b>G3</b>	<b>G2</b>	<b>M</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>	<b>P8</b>	<b>P10</b>
M	<b>0,0</b>	<b>G6</b>	<b>G4</b>	<b>G2</b>	<b>G1</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P7</b>	<b>P9</b>
MPG	<b>0,0</b>	<b>G7</b>	<b>G5</b>	<b>G3</b>	<b>G2</b>	<b>M</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P5</b>	<b>P7</b>	<b>P8</b>
PG	<b>0,0</b>	<b>G8</b>	<b>G6</b>	<b>G4</b>	<b>G2</b>	<b>G1</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P4</b>	<b>P6</b>	<b>P8</b>
G	<b>0,0</b>	<b>G9</b>	<b>G7</b>	<b>G5</b>	<b>G3</b>	<b>G2</b>	<b>M</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P5</b>	<b>P7</b>
MG	<b>0,0</b>	<b>G9</b>	<b>G8</b>	<b>G6</b>	<b>G4</b>	<b>G2</b>	<b>G1</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>
MX	<b>0,0</b>	<b>G10</b>	<b>G9</b>	<b>G7</b>	<b>G5</b>	<b>G3</b>	<b>G1</b>	<b>M</b>	<b>P1</b>	<b>P4</b>	<b>P6</b>



**Figura 14. Conjuntos fuzzy para o tempo de aeração do grão**

**Quadro 4. Nomenclatura, símbolo e valor atribuído para os conjuntos fuzzy de  $t_{aer}$ .**

Conjuntos Fuzzy para $t_{aer}$	Símbolo	Valor Atribuído (h)
Mínimo	<b>MI</b>	<b>20</b>
Pequeno com grau 11	<b>P11</b>	<b>25</b>
Pequeno com grau 10	<b>P10</b>	<b>30</b>
Pequeno com grau 9	<b>P9</b>	<b>35</b>
Pequeno com grau 8	<b>P8</b>	<b>40</b>
Pequeno com grau 7	<b>P7</b>	<b>45</b>
Pequeno com grau 6	<b>P6</b>	<b>50</b>
Pequeno com grau 5	<b>P5</b>	<b>55</b>
Pequeno com grau 4	<b>P4</b>	<b>60</b>
Pequeno com grau 3	<b>P3</b>	<b>65</b>
Pequeno com grau 2	<b>P2</b>	<b>70</b>
Pequeno com grau 1	<b>P1</b>	<b>75</b>
Médio	<b>M</b>	<b>80</b>
Grande com grau 1	<b>G1</b>	<b>85</b>
Grande com grau 2	<b>G2</b>	<b>90</b>
Grande com grau 3	<b>G3</b>	<b>95</b>
Grande com grau 4	<b>G4</b>	<b>100</b>
Grande com grau 5	<b>G5</b>	<b>105</b>
Grande com grau 6	<b>G6</b>	<b>110</b>
Grande com grau 7	<b>G7</b>	<b>115</b>
Grande com grau 8	<b>G8</b>	<b>120</b>
Grande com grau 9	<b>G9</b>	<b>125</b>
Grande com grau 10	<b>G10</b>	<b>130</b>
Grande com grau 11	<b>G11</b>	<b>135</b>
Máximo	<b>MX</b>	<b>140</b>

Como citado anteriormente, podem-se alterar os limites inferior e superior e a amplitude dos intervalos das Figuras 12, 13 e 14, conforme as necessidades e conforme o comportamento do sistema de aeração de cada silo.

Para o tempo de aeração ( $t_{aer}$ ), foram definidos 25 conjuntos fuzzy: MI, P11,..., G11, MX, subdivididos em 24 intervalos com amplitude de 5 horas. Cada um deles recebe um valor numérico são chamado de “valor atribuído”. Este representa um tempo de aeração para cada um dos conjuntos fuzzy, conforme o Quadro 4. É importante ressaltar que, quanto maior o número de conjuntos fuzzy adotados, maior será o refinamento dos intervalos e, portanto, maior precisão na determinação do tempo de aeração; entretanto, uma quantidade excessiva pode tornar o modelo “cansativo”.

O tempo de aeração varia muito em função das duas grandezas principais no processo da aeração, que são a variação da temperatura do grão ( $\Delta\theta$ ) e da umidade do grão ( $U$ ), as quais já foram consideradas no modelo, conforme o Quadro 3. Outras duas grandezas que também influenciam no tempo de aeração são a temperatura final do grão ( $\theta_f$ ) e a umidade relativa do ar ( $\varepsilon$ ).

Desta forma, são utilizadas as seguintes equações para a determinação dos limites inferior (MI) e superior (MX), as quais são resultados de análises feitas no comportamento do silo padrão adotado:

$$MI = (-5,84\theta_f + 349,55) \cdot e^{(-29,1 \cdot 10^{-5} \theta_f - 9 \cdot 10^{-3}) \cdot \varepsilon} \quad (24)$$

$$MX = (-4,24\theta_f + 435,97) \cdot e^{(-34 \cdot 10^{-5} \theta_f - 4,45 \cdot 10^{-3}) \cdot \varepsilon} \quad (25)$$

Uma vez determinados estes limites inferior (MI) e superior (MX) para o tempo de aeração, em função da temperatura final do grão ( $\theta_f$ ) e da umidade relativa do ar ( $\varepsilon$ ), os demais conjuntos fuzzy serão determinados, subdivididos em intervalos de mesma amplitude, conforme a quantidade de conjuntos fuzzy adotados, no caso deste modelo, em 24 intervalos, através das seguintes expressões:

$$P_i = MI + (12 - i) \cdot \frac{MX - MI}{24} \quad (26)$$

$$M = MI + \frac{MX - MI}{2} \quad (27)$$

$$G_i = MI + (12 + i) \cdot \frac{MX - MI}{24}, \quad (28)$$

para  $i = 1, 2, \dots, 11$ .

#### 5.2.1.7 Recuperação da importância do tempo de aeração

A recuperação da importância do tempo de aeração ( $t_i$ ), correspondente a cada regra fuzzy ( $\mu_{R_i}$ ), é feita utilizando-se a tabela fuzzy  $\Delta\theta \times U$  (Quadro 3). Para cada par ordenado ( $\Delta\theta, U$ ), obtém-se o correspondente conjunto fuzzy para ( $t_i$ ), ao qual será atribuído um valor, conforme o Quadro 4. Os símbolos acompanhados do sinal ( $'$ ), representam o conjunto fuzzy complementar:

$$t_1 = (\Delta\theta, U) \quad (29)$$

$$t_2 = (\Delta\theta, U') \quad (30)$$

$$t_3 = (\Delta\theta', U) \quad (31)$$

$$t_4 = (\Delta\theta', U') \quad (32)$$

#### 5.2.1.8 Tempo de aeração

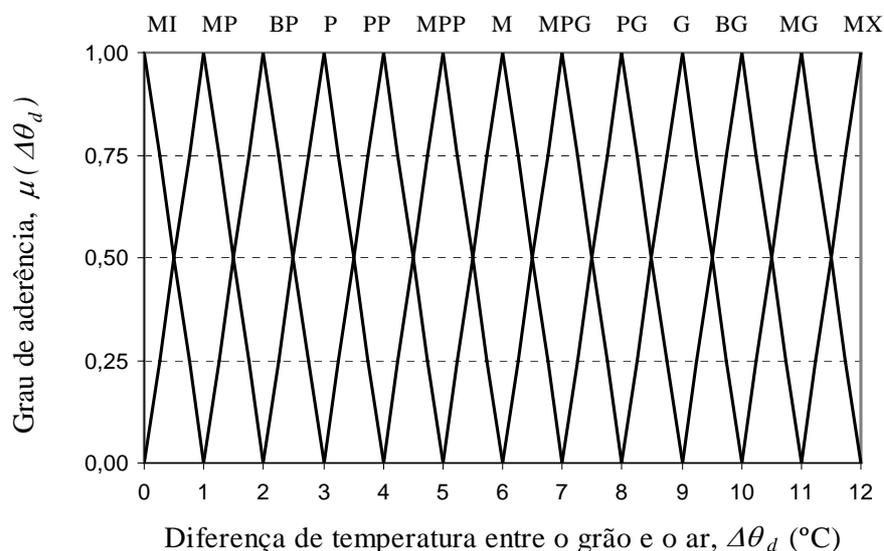
O cálculo do valor do tempo de aeração ( $t_{aer}$ ), é feito pelo método de defuzzyficação (centro de massa):

$$t_{aer} = \frac{\mu_{R_1} t_1 + \mu_{R_2} t_2 + \mu_{R_3} t_3 + \mu_{R_4} t_4}{\mu_{R_1} + \mu_{R_2} + \mu_{R_3} + \mu_{R_4}} \quad (33)$$

### 5.2.2 Modelo fuzzy para a condução racional da aeração

A seguir, descreve-se o modelo matemático fuzzy para a determinação da condução racional da aeração ( $\Psi$ ), a qual é função da amplitude da diferença da temperatura média do grão e do ar externo ( $\Delta\theta_d = \theta_g - \theta_{ar}$ , onde  $\theta_g$  é a temperatura do grão e  $\theta_{ar}$  a temperatura do ar externo) e da umidade relativa do ar externo ( $\varepsilon$ ).

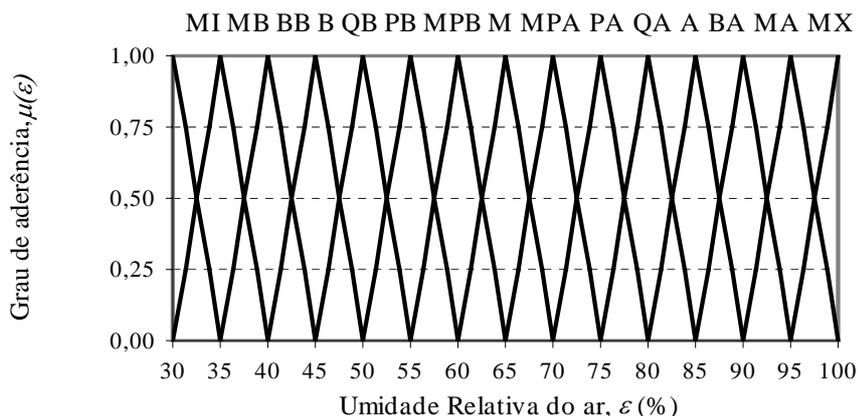
Os conjuntos fuzzy para a diferença da temperatura do grão e do ar externo ( $\Delta\theta_d$ ), o limite inferior de 0°C e o superior de 12°C, bem como a amplitude dos intervalos de 1°C, são adotados baseando-se no “Diagrama de Condução da Aeração”, desenvolvido pelo “Instituto Técnico de Cereais e Forragens”, e estão representados na Figura 15. A nomenclatura dos símbolos adotados para os conjuntos fuzzy da Figura 15 estão descritos no Quadro 5.



**Figura 15. Conjuntos fuzzy para a diferença de temperatura do grão e do ar externo**  
Quadro 5. Nomenclatura e símbolo para os conjuntos fuzzy de  $\Delta\theta_d$ .

Conjuntos fuzzy para $\Delta\theta_d$	Símbolo
Mínima	<b>MI</b>
Muito Pequena	<b>MP</b>
Bem Pequena	<b>BP</b>
Pequena	<b>P</b>
Pouco Pequena	<b>PP</b>
Muito Pouco Pequena	<b>MPP</b>
Média	<b>M</b>
Muito Pouco Grande	<b>MPG</b>
Pouco Grande	<b>PG</b>
Grande	<b>G</b>
Bem Grande	<b>BG</b>
Muito Grande	<b>MG</b>
Máxima	<b>MX</b>

Para a umidade relativa do ar externo ( $\varepsilon$ ), os conjuntos fuzzy adotados, os limites inferior e superior de 30% e 100%, respectivamente, em intervalos com amplitude de 5%, também são baseados no “*Diagrama de Condução da Aeração*” e estão representados na Figura 16. A nomenclatura dos símbolos adotados para os conjuntos fuzzy da Figura 16 estão descritos no Quadro 6.



**Figura 16. Conjuntos fuzzy para a umidade relativa do ar externo**

Quadro 6. Nomenclatura e símbolo para os conjuntos fuzzy de  $\varepsilon$ .

Conjuntos fuzzy para $\varepsilon$	Símbolo
Mínima	<b>MI</b>
Muito Baixa	<b>MB</b>
Bem Baixa	<b>BB</b>
Baixa	<b>B</b>
Quase Baixa	<b>QB</b>
Pouco Baixa	<b>PB</b>
Muito Pouco Baixa	<b>MPB</b>
Média	<b>M</b>
Muito Pouco Alta	<b>MPA</b>
Pouco Alta	<b>PA</b>
Quase Alta	<b>QA</b>
Alta	<b>A</b>
Bem Alta	<b>BA</b>
Muito Alta	<b>MA</b>
Máxima	<b>MX</b>

Os índices  $I$  e  $J$ , que identificam os intervalos numéricos de cada conjunto fuzzy, para  $\Delta\theta_d$  e  $\varepsilon$ , respectivamente, são determinados através das seguintes expressões:

$$I = \text{int}(\Delta\theta_d + 1) \quad (34)$$

$$J = \text{int}\left(\frac{\varepsilon - 25}{5}\right) \quad (35)$$

Os graus de aderência  $\mu(\Delta\theta_d)$  e  $\mu(\varepsilon)$ , respectivamente, para cada elemento do conjunto fuzzy mais à esquerda das Figuras 15 e 16, em função dos índices  $I$  e  $J$ , são dados por:

$$\mu(\Delta\theta_d) = 1 - \Delta\theta_d \quad (36)$$

$$\mu(\varepsilon) = \frac{5J - \varepsilon + 30}{5} \quad (37)$$

De acordo com a Teoria Fuzzy, o grau de aderência complementar é dado por:

$$\mu'(\Delta\theta_d) = 1 - \mu(\Delta\theta_d) \quad (38)$$

$$\mu'(\varepsilon) = 1 - \mu(\varepsilon) \quad (39)$$

Com a determinação dos quatro graus de aderência acima, as regras fuzzy são aplicadas para a combinação dos graus de aderência. São elas:

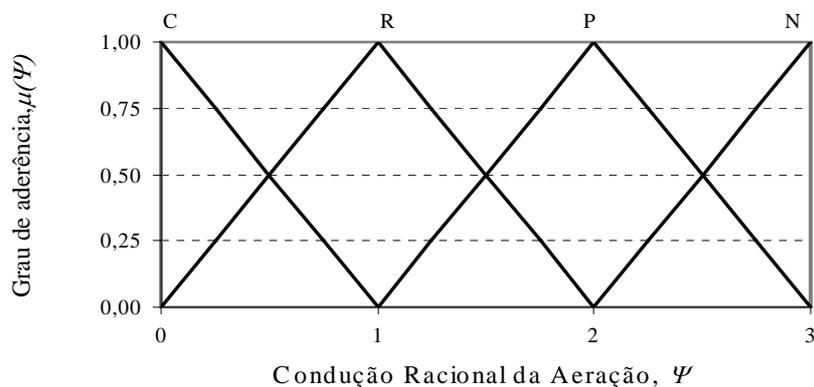
$$\mu_{R_1} = \min\{\mu(\Delta\theta_d); \mu(\varepsilon)\} \quad (40)$$

$$\mu_{R_2} = \min\{\mu(\Delta\theta_d); \mu'(\varepsilon)\} \quad (41)$$

$$\mu_{R_3} = \min\{\mu'(\Delta\theta_d); \mu(\varepsilon)\} \quad (42)$$

$$\mu_{R_4} = \min\{\mu'(\Delta\theta_d); \mu'(\varepsilon)\} \quad (43)$$

Os conjuntos fuzzy adotados para a condução racional da aeração ( $\Psi$ ) são aqueles contidos no “*Diagrama de Condução da Aeração*” e estão representados na Figura 17. Para cada um destes conjuntos fuzzy adota-se um valor numérico, chamado de “valor atribuído”, o qual representa o elemento do conjunto fuzzy com maior grau de aderência, ou seja,  $\mu(\Psi)=1$ . Os nomes dos conjuntos fuzzy e os valores atribuídos na Figura 17 estão representados no Quadro 7. Os limites inferior e superior, bem como a amplitude dos intervalos da Figura 17, são adotados para resgatar numericamente as variáveis lingüísticas usadas no “*Diagrama de Condução da Aeração*”. É importante ressaltar que, neste caso, os limites inferior e superior e a amplitude dos intervalos podem ser alterados para outros valores, sem comprometer o resultado final do experimento.



**Figura 17. Conjuntos fuzzy para a condução racional da aeração**

Quadro 7. Nomenclatura e símbolo para os conjuntos fuzzy de  $\Psi$ .

Conjuntos Fuzzy para $\Psi$	Símbolo	Valor atribuído
Possível com Cuidados	<b>C</b>	<b>0</b>
Recomendável	<b>R</b>	<b>1</b>
Possível	<b>P</b>	<b>2</b>
Não Recomendável	<b>N</b>	<b>3</b>

O Quadro 8, que é uma tabela fuzzy de  $\Delta\theta \times \varepsilon$ , é construído baseando-se no “Diagrama de Condução da Aeração” em outras palavras, ele representa a condução racional de aeração ( $\Psi$ ). Apesar da últimas três colunas apresentarem a mesma distribuição, torna-se interessante a manutenção das duas últimas para traduzir fielmente o diagrama da aeração.

Quadro 8. Condução Racional da Aeração ( $\Psi$ ).

$\Delta\theta_i$ $\varepsilon$	MI	MP	BP	P	PP	MPP	M	MPG	PG	G	BG	MG	MX
MI	R	R	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
MB	R	R	R	C	C	C	C	C	C	C	C	C	C
BB	P	R	R	R	C	C	C	C	C	C	C	C	C
B	P	P	R	R	C	C	C	C	C	C	C	C	C
QB	P	P	P	R	R	C	C	C	C	C	C	C	C
PB	N	P	P	P	R	R	C	C	C	C	C	C	C
MPB	N	N	P	P	R	R	C	C	C	C	C	C	C
M	N	N	P	P	P	R	R	C	C	C	C	C	C
MPA	N	N	N	P	P	R	R	C	C	C	C	C	C
PA	N	N	N	N	P	P	R	R	C	C	C	C	C
QA	N	N	N	N	P	P	R	R	C	C	C	C	C
A	N	N	N	N	N	P	P	R	R	C	C	C	C
BA	N	N	N	N	N	P	P	R	R	C	C	C	C
MA	N	N	N	N	N	N	P	P	R	R	C	C	C
MX	N	N	N	N	N	N	P	P	R	R	C	C	C

A recuperação da importância da condução racional da aeração ( $\Psi$ ), correspondente a cada regra fuzzy  $\mu_{R_i}$ , é feita utilizando-se o Quadro 8 e as equações (44) a (47). Para cada par ordenado  $(\Delta\theta_i, \varepsilon)$ , obtém-se o correspondente conjunto fuzzy para  $\Psi_i$ , ao

qual será atribuído um valor, conforme o Quadro 7. Os símbolos acompanhados do sinal ( $\bar{\cdot}$ ), representam o conjunto fuzzy complementar. Têm-se:

$$\Psi_1 = (\Delta\theta_d, \varepsilon) \quad (44)$$

$$\Psi_2 = (\Delta\theta_d, \varepsilon') \quad (45)$$

$$\Psi_3 = (\Delta\theta'_d, \varepsilon) \quad (46)$$

$$\Psi_4 = (\Delta\theta'_d, \varepsilon') \quad (47)$$

O cálculo do valor da condução da aeração é feito pelo método de defuzzyficação (centro de massa):

$$\Psi = \frac{\mu_{R_1}\Psi_1 + \mu_{R_2}\Psi_2 + \mu_{R_3}\Psi_3 + \mu_{R_4}\Psi_4}{\mu_{R_1} + \mu_{R_2} + \mu_{R_3} + \mu_{R_4}} \quad (48)$$

A exemplo da construção anterior, é necessário determinar um índice  $K$ , o qual identifica os intervalos da Figura 17, através do valor do elemento ( $\Psi$ ) obtido pela equação (48). Ele é dado por:

$$K = \text{int}(\Psi + 1) \quad (49)$$

O grau de aderência  $\mu(\Psi)$  para o elemento ( $\Psi$ ) pertencente ao conjunto fuzzy mais à esquerda da Figura 17, em função da linearização do índice  $K$ , é determinado por:

$$\mu(\Psi) = K - \Psi \quad (50)$$

O grau de aderência do elemento ( $\Psi$ ) pertencente ao conjunto fuzzy complementar é calculado por:

$$\mu'(\Psi) = 1 - \mu(\Psi) \quad (51)$$

Com o valor de  $\Psi$  obtido em (48) e com o auxílio do Quadro 7, a conclusão sobre a condução racional da aeração está automaticamente determinada. No entanto, com o auxílio das equações (50) e (51), podem ser obtidos dois parâmetros a mais para conduzir a aeração, uma vez que estas duas equações fornecem o quanto mais próximo de uma determinada região de aeração a situação encontra-se, segundo o “*Diagrama de Condução da Aeração*”, mostrado na Figura 2 de (4.2).

### 5.2.3 Modelo fuzzy para obtenção da frequência

Pelo item (5.2.1), pode-se determinar um tempo de aeração ( $t_{aer}$ ) para que uma certa massa de grãos atinja as condições desejadas de armazenamento, quando o motor de indução opera com frequência nominal igual a 60 Hz. Este tempo de aeração pode ser aumentado sem que haja prejuízo para a massa de grãos, quando o motor é alimentado por

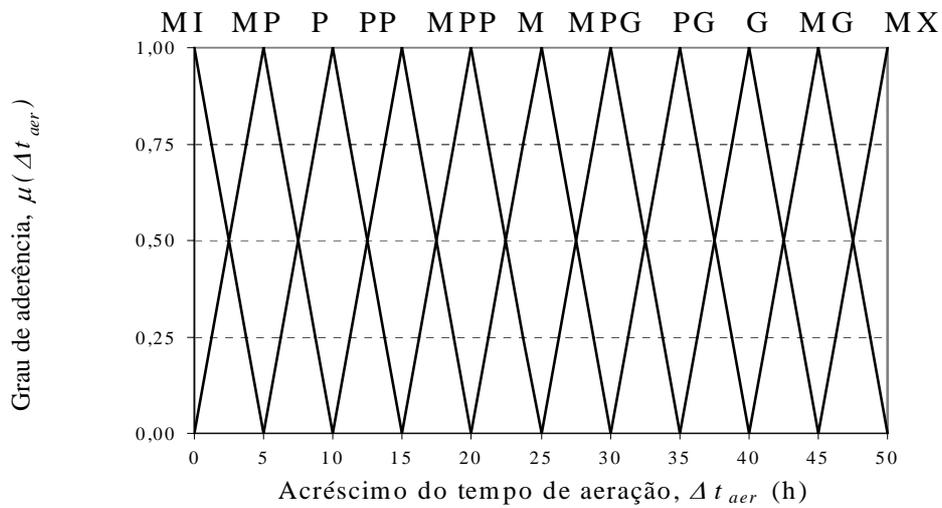
um conversor de frequência, permitindo que o sistema opere com velocidade variável, visando uma redução no consumo de energia elétrica.

Uma vez determinado o tempo de aeração ( $t_{aer}$ ), o operador do silo pode decidir, com base no modelo desenvolvido, em função das condições de temperatura e umidade da massa de grãos e do ar externo, qual deve ser o acréscimo no tempo de aeração para que se atinja a condição desejada de armazenamento.

O acréscimo no tempo de aeração é obtido em função da redução da vazão do ventilador, a qual é diretamente proporcional à velocidade do motor de indução. A redução da velocidade é obtida através da diminuição da frequência do conversor.

Desta forma, são definidas as duas variáveis em questão: o acréscimo do tempo de aeração e a frequência. Com o acréscimo do tempo, o processo de aeração continua até a massa de grãos atingir a condição desejada, logo, a variação da temperatura do grão, que é uma das variáveis mais importante no processo de aeração, dever ser controlada.

Portanto, para a determinação da frequência ( $f$ ) de operação do conversor, utilizam-se os conjuntos fuzzy da variação da temperatura ( $\Delta\theta$ ) e do acréscimo do tempo de aeração ( $\Delta t_{aer}$ ). Os conjuntos fuzzy para ( $\Delta\theta$ ), bem como os limites e as amplitudes dos intervalos, são os mesmos e já definidos anteriormente. Os conjuntos fuzzy de ( $\Delta t_{aer}$ ) estão definidos na Figura 18, na qual os limites inferior e superior foram adotados de 0 e 50 horas, com intervalos de variação de 5 horas. É interessante ressaltar que tais limites e intervalos de variação podem ser alterados para qualquer condição; por exemplo, se é possível e conveniente ao produtor, pode-se estabelecer o limite superior de 100 horas em intervalos de 10 horas.



**Figura 18. Conjuntos fuzzy para o acréscimo do tempo de aeração**

Os nomes e os símbolos dos conjuntos fuzzy adotados na Figura 18 estão descritos no Quadro 9.

Quadro 9. Nomenclatura, símbolo e valor atribuído para os conjuntos fuzzy de  $\Delta t_{aer}$ .

Conjuntos Fuzzy para $\Delta t_{aer}$	Símbolo
Mínimo	<b>MI</b>
Muito Pequeno	<b>MP</b>
Pequeno	<b>P</b>
Pouco Pequeno	<b>PP</b>
Muito Pouco Pequeno	<b>MPP</b>
Médio	<b>M</b>
Muito Pouco Grande	<b>MPG</b>
Pouco Grande	<b>PG</b>
Grande	<b>G</b>
Muito Grande	<b>MG</b>
Máximo	<b>MX</b>

O índice  $K$ , que identifica os intervalos numéricos de cada conjunto fuzzy para  $(\Delta t_{aer})$ , é calculado por:

$$K = \text{int}\left(\frac{\Delta t_{aer} + 5}{5}\right) \quad (52)$$

O grau de aderência  $\mu(\Delta t_{aer})$  para cada elemento ( $\Delta t_{aer}$ ) da Figura 18, pertencente ao conjunto fuzzy mais à esquerda, é calculado por:

$$\mu(\Delta t_{aer}) = \frac{5K - \Delta t_{aer}}{5} \quad (53)$$

O grau de aderência para o elemento complementar é dado por:

$$\mu'(\Delta t_{aer}) = 1 - \mu(\Delta t_{aer}) \quad (54)$$

Com o cálculo do índice ( $K$ ) e os graus de aderência  $\mu(\Delta t_{aer})$  e  $\mu'(\Delta t_{aer})$ , são aplicadas as regras fuzzy para a combinação dos graus de aderência, obtendo-se:

$$\mu_{R_1} = \min\{\mu(\Delta t_{aer}); \mu(\Delta\theta)\} \quad (55)$$

$$\mu_{R_2} = \min\{\mu(\Delta t_{aer}); \mu'(\Delta\theta)\} \quad (56)$$

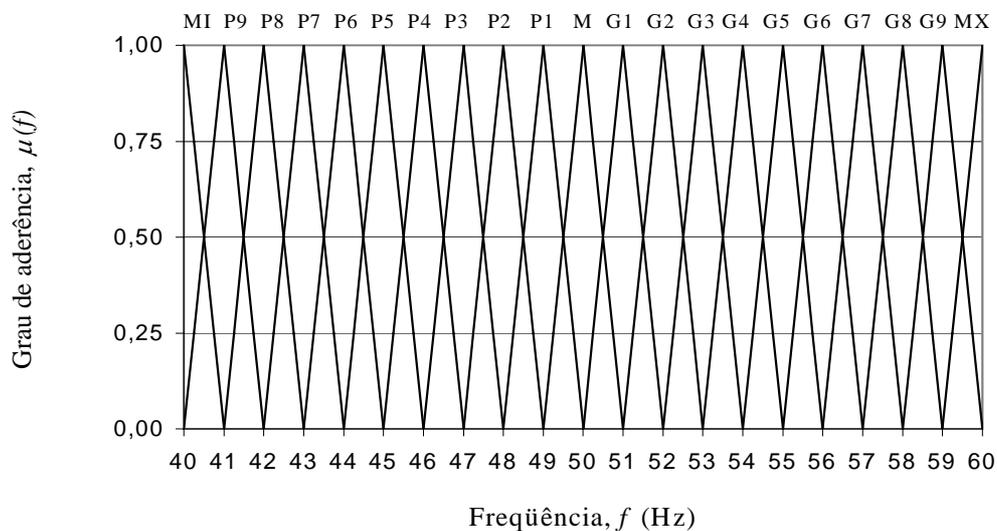
$$\mu_{R_3} = \min\{\mu'(\Delta t_{aer}); \mu(\Delta\theta)\} \quad (57)$$

$$\mu_{R_4} = \min\{\mu'(\Delta t_{aer}); \mu'(\Delta\theta)\} \quad (58)$$

O Quadro 10, mostra a fuzzy  $\Delta\theta \times \Delta t_{aer}$ , a qual representa o comportamento da frequência do conversor que aciona o motor do sistema de aeração do silo, é construída analisando-se a velocidade do motor, a nova vazão específica e as alterações de temperatura e umidade da massa de grão ensilada. Nota-se uma maior influência do acréscimo no tempo de aeração do que da variação da temperatura na determinação da frequência. Os conjuntos fuzzy e a amplitude dos intervalos são escolhidos conforme o comportamento do sistema e estão representados na Figura 19. Os nomes e os símbolos dos conjuntos fuzzy adotados para a frequência do conversor ( $f$ ) estão descritos no Quadro 11.

Quadro 10. Frequência do motor ( $f$ ) em função do acréscimo do tempo de aeração ( $\Delta t_{aer}$ ) e da variação da temperatura  $\Delta\theta$ .

$\Delta\theta$ $\Delta t_{aer}$	MI	MP	P	PP	MPP	M	MPG	PG	G	MG	MX
MI	<b>MX</b>										
MP	<b>MX</b>	<b>G9</b>									
P	<b>MX</b>	<b>G8</b>	<b>G8</b>	<b>G8</b>	<b>G7</b>	<b>G7</b>	<b>G7</b>	<b>G7</b>	<b>G7</b>	<b>G6</b>	<b>G6</b>
PP	<b>MX</b>	<b>G6</b>	<b>G6</b>	<b>G6</b>	<b>G5</b>	<b>G5</b>	<b>G5</b>	<b>G4</b>	<b>G4</b>	<b>G4</b>	<b>G3</b>
MPP	<b>MX</b>	<b>G4</b>	<b>G4</b>	<b>G3</b>	<b>G3</b>	<b>G3</b>	<b>G2</b>	<b>G2</b>	<b>G2</b>	<b>G1</b>	<b>M</b>
M	<b>MX</b>	<b>G2</b>	<b>G2</b>	<b>G1</b>	<b>G1</b>	<b>G1</b>	<b>M</b>	<b>M</b>	<b>M</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>
MPG	<b>MX</b>	<b>M</b>	<b>M</b>	<b>M</b>	<b>M</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>
PG	<b>MX</b>	<b>P1</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>
G	<b>MX</b>	<b>P3</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>	<b>P7</b>	<b>P7</b>	<b>P8</b>
MG	<b>MX</b>	<b>P4</b>	<b>P5</b>	<b>P5</b>	<b>P6</b>	<b>P6</b>	<b>P7</b>	<b>P7</b>	<b>P8</b>	<b>P9</b>	<b>MI</b>
MX	<b>MX</b>	<b>P6</b>	<b>P6</b>	<b>P7</b>	<b>P7</b>	<b>P8</b>	<b>P8</b>	<b>P9</b>	<b>MI</b>	<b>MI</b>	<b>MI</b>



**Figura 19. Conjuntos fuzzy para a frequência**

**Quadro 11. Nomenclatura, símbolo e valor atribuído para os conjuntos fuzzy de  $f$ .**

Conjuntos Fuzzy para $f$	Símbolo	Valor atribuído (Hz)
Mínima	<b>MI</b>	<b>40</b>
Pequeno com grau 9	<b>P9</b>	<b>41</b>
Pequeno com grau 8	<b>P8</b>	<b>42</b>
Pequeno com grau 7	<b>P7</b>	<b>43</b>
Pequeno com grau 6	<b>P6</b>	<b>44</b>
Pequeno com grau 5	<b>P5</b>	<b>45</b>
Pequeno com grau 4	<b>P4</b>	<b>46</b>
Pequeno com grau 3	<b>P3</b>	<b>47</b>
Pequeno com grau 2	<b>P2</b>	<b>48</b>
Pequeno com grau 1	<b>P1</b>	<b>49</b>
Média	<b>M</b>	<b>50</b>
Grande com grau 1	<b>G1</b>	<b>51</b>
Grande com grau 2	<b>G2</b>	<b>52</b>
Grande com grau 3	<b>G3</b>	<b>53</b>
Grande com grau 4	<b>G4</b>	<b>54</b>
Grande com grau 5	<b>G5</b>	<b>55</b>
Grande com grau 6	<b>G6</b>	<b>56</b>
Grande com grau 7	<b>G7</b>	<b>57</b>
Grande com grau 8	<b>G8</b>	<b>58</b>
Grande com grau 9	<b>G9</b>	<b>59</b>
Máxima	<b>MX</b>	<b>60</b>

Observa-se que o acréscimo no tempo de aeração varia muito, para uma pequena variação da frequência. Portanto, no refinamento implementado adotam-se 21 conjuntos fuzzy: MI, P9,..., G9, MX, subdivididos em 20 intervalos de amplitudes iguais a 1Hz. O conjunto fuzzy MX deve receber o valor 60Hz, que é a frequência nominal. Os demais conjuntos fuzzy poderão receber qualquer valor de frequência, até um limite inferior MI, desde que o motor possa ser acionado.

O valor do tempo de aeração é influenciado por outras grandezas, tais como: a variação da temperatura do grão ( $\Delta\theta$ ), a umidade do grão ( $U$ ) e a umidade relativa do ar ( $\varepsilon$ ). Como a variação do tempo de aeração será definida pela variação da frequência, estas grandezas deverão ser consideradas na determinação da frequência.

Desta forma, são utilizadas as seguintes equações para a determinação dos limites inferior (MI) e superior (G9), uma vez que (MX) já está definido, as quais são resultados de análises feitas no comportamento do silo padrão adotado:

$$\begin{aligned}
 MI = & [(1,39 \cdot 10^{-5} \Delta\theta + 1,13 \cdot 10^{-3}) \cdot \varepsilon + \\
 & (5 \cdot 10^{-5} \Delta\theta^2 + 2 \cdot 10^{-4} \Delta\theta + 0,137)] \cdot U \\
 & + (-3,6 \cdot 10^{-3} \Delta\theta - 0,112) \cdot \varepsilon + (-2,2 \cdot 10^{-3} \Delta\theta^2 + 0,0183 \Delta\theta + 51,103)
 \end{aligned} \quad (59)$$

$$\begin{aligned}
 G9 = & [(2 \cdot 10^{-4} \Delta\theta + 4 \cdot 10^{-3}) \cdot \varepsilon + (-2,5 \cdot 10^{-3} \Delta\theta + 0,203)] \cdot \ln(U) \\
 & + (-1,4 \cdot 10^{-3} \Delta\theta - 0,0245) \cdot \varepsilon + (0,0179 \Delta\theta + 58,78)
 \end{aligned} \quad (60)$$

Uma vez determinados estes limites inferior (MI) e superior (G9) para a frequência, em função da variação da temperatura do grão ( $\Delta\theta$ ), da umidade do grão ( $U$ ) e da umidade relativa do ar ( $\varepsilon$ ), os demais conjuntos fuzzy serão determinados, subdivididos em intervalos de mesma amplitude, conforme a quantidade de conjuntos fuzzy adotados, no caso deste modelo, em 20 intervalos, através das seguintes expressões:

$$P_i = MI + (10 - i) \cdot \frac{MX - MI}{19} \quad (61)$$

$$M = MI + 10 \cdot \frac{MX - MI}{19} \quad (62)$$

$$G_j = MI + (10 + j) \cdot \frac{MX - MI}{19}, \quad (63)$$

para  $i = 1, 2, \dots, 9$  e  $j = 1, 2, \dots, 8$

A recuperação da importância da frequência ( $f_i$ ), correspondente a cada regra fuzzy ( $\mu_{R_i}$ ), é feita utilizando-se o Quadro 10 e as Equações (64) a (67). Para cada par ordenado ( $\Delta\theta, \Delta t_{aer}$ ), obtém-se o correspondente conjunto fuzzy para cada ( $f_i$ ), ao qual é atribuído um valor, conforme o Quadro 11. Os símbolos acompanhados do sinal ( $\bar{\quad}$ ), representam o conjunto fuzzy complementar.

$$f_1 = ( \Delta\theta, \Delta t_{aer} ) \quad (64)$$

$$f_2 = ( \Delta\theta, \Delta t'_{aer} ) \quad (65)$$

$$f_3 = ( \Delta\theta', \Delta t_{aer} ) \quad (66)$$

$$f_4 = ( \Delta\theta', \Delta t'_{aer} ) \quad (67)$$

O cálculo do valor da frequência do conversor ( $f$ ) é dado por:

$$f = \frac{\mu_{R_1} f_1 + \mu_{R_2} f_2 + \mu_{R_3} f_3 + \mu_{R_4} f_4}{\mu_{R_1} + \mu_{R_2} + \mu_{R_3} + \mu_{R_4}} \quad (68)$$

## 6 RESULTADOS E DISCUSSÃO

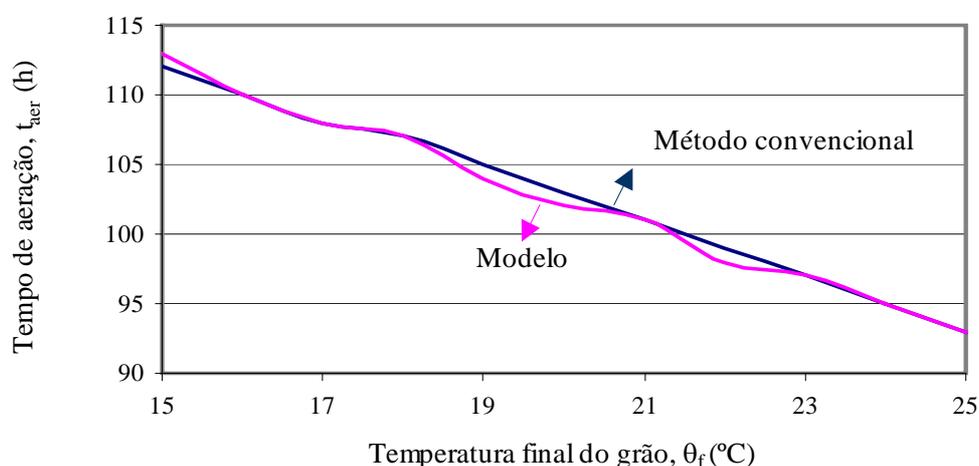
### 6.1 Modelo fuzzy para obtenção do tempo de aeração

O tempo de aeração ( $t_{aer}$ ) varia em função das principais grandezas que influenciam no processo de aeração, que são: a temperatura final do grão ( $\theta_f$ ), temperatura inicial do grão ( $\theta_i$ ), temperatura do ar externo ( $\theta_{ar}$ ), umidade do grão ( $U$ ) e umidade relativa do ar externo ( $\varepsilon$ ).

Nas células equipadas com determinada capacidade de aeração, a duração do resfriamento não é uma constante, dependendo, principalmente, das características do grão: umidade e temperatura; por isto, toda aeração necessita de controle. Constata-se que quanto mais frio estiver o grão, maior será o tempo de aeração para abaixar sua temperatura, ou seja, é mais fácil abaixar a temperatura de 30°C para 20°C do que de 20°C para 15°C. Isso se deve ao fato de que, primeiro é retirada a umidade e a temperatura superficial do grão, e numa etapa seguinte, mais demorada, retira-se a umidade e a temperatura armazenada no interior do grão.

Na Figura 20, apresenta-se o comportamento do tempo de aeração em função da temperatura final do grão. Pode-se notar que, quanto maior a temperatura final (temperatura desejada de armazenamento), menor será o tempo de aeração. Este fato se deve às características físicas (umidade e temperatura) do ar de aeração e do grão. Na simulação apresentada, utiliza-se a umidade comercial padrão de 14%, a umidade relativa média do ar de 80% e supondo que a massa de grãos tenha sofrido um aquecimento até atingir a temperatura inicial de 30°C.

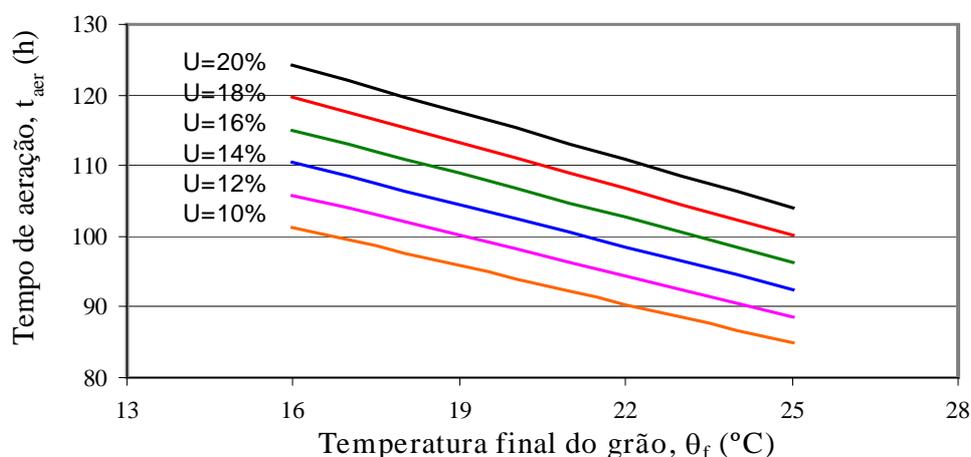
Na comparação entre o método convencional, segundo Lasseran (1981), e o modelo desenvolvido, observa-se que eles praticamente não diferem. As pequenas diferenças notadas, com erro inferior a 2%, são perfeitamente desprezíveis em relação ao número total de horas de aeração.



**Figura 20.** Cálculo do tempo de aeração em função da temperatura final do grão utilizando o método convencional e o modelo para:  $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ ,  $U = 14\%$  e  $\varepsilon = 80\%$

A umidade do grão é responsável por vários fenômenos no processo de aeração. Um deles é que, quanto maior a umidade do grão, maior é a dificuldade de troca de calor entre ele e o ar.

Na Figura 21, apresenta-se o comportamento do tempo de aeração em função da temperatura final do grão para vários valores da umidade do grão ( $U$ ). Observa-se que quanto maior a umidade do grão, maior será o tempo de aeração para uma temperatura final do grão ( $\theta_f$ ) específica. Nesta figura, apresenta-se uma família de curvas, mostrando o comportamento do processo de aeração. Desta forma, pode-se visualizar as várias possibilidades de armazenagem e o tempo de aeração necessário para atingir tal objetivo.

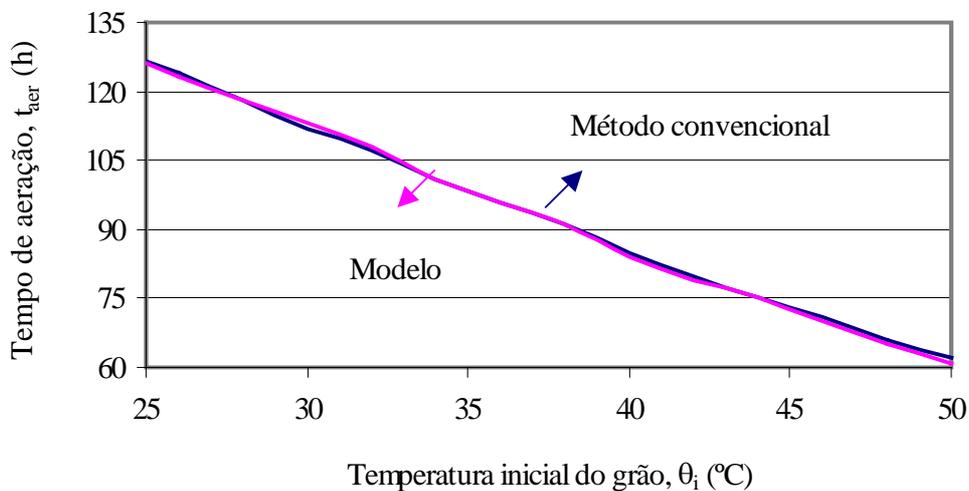


**Figura 21. Cálculo do tempo de aeração em função da temperatura final do grão para vários valores da umidade do grão ( $\theta_i = 30^\circ\text{C}$  e  $\varepsilon = 80\%$ )**

A temperatura inicial do grão é considerada como sendo a temperatura da massa de grãos armazenada, quando esta sofreu um aquecimento, ou, então, ela é proveniente do secador com alta temperatura. Nos dois casos, ela necessita ser aerada para reduzir sua temperatura até aquela desejada.

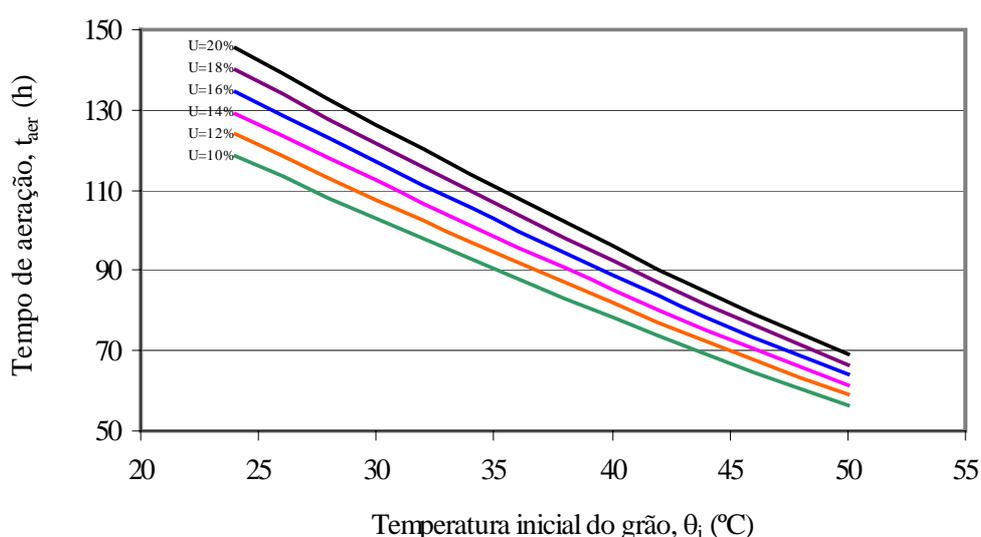
Observando-se a Figura 22, verifica-se que, quanto maior a temperatura inicial do grão, menor é o tempo de aeração necessário para levar essa temperatura à temperatura final desejada.

Na comparação entre o método convencional e o modelo desenvolvido, observa-se que o convencional tem um comportamento linear. Já o modelo desenvolvido tem um comportamento não linear e isto é consequência da construção da tabela  $\Delta\theta \times U$  apresentada no Quadro 3 de (5.2.1.6), na qual, para um mesmo valor de  $\Delta\theta$  ou  $U$ , podem ocorrer valores muito próximos para o tempo de aeração. Apesar disto, a diferença entre o tempo de aeração calculado através dos dois modelos não excede 2%, valor este muito pequeno se comparado ao tempo total de aeração.



**Figura 22.** Cálculo do tempo de aeração em função da temperatura inicial do grão utilizando o método convencional e o modelo para:  $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ ,  $U = 14\%$  e  $\varepsilon = 80\%$

Na Figura 23, apresenta-se o comportamento do tempo de aeração em função da temperatura inicial do grão, mostrando a influência da umidade do grão. Observa-se que, quanto maior a umidade do grão, maior será o tempo de aeração necessário para atingir as condições desejadas. Isto acontece porque, quanto maior a umidade do grão, maior será a umidade relativa do ar para que haja o equilíbrio higroscópico. O grão quente e úmido necessita de longos períodos de aeração, pois, nestas condições, o poder de deterioração do produto é muito rápido e perigoso. O grão úmido, mesmo a baixas temperaturas, tem a característica de aquecer mais rapidamente do que o grão seco.

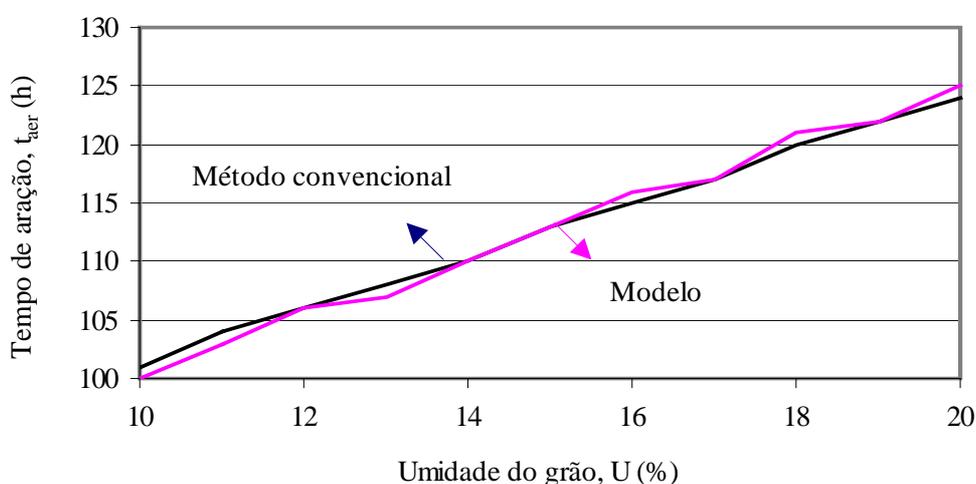


**Figura 23. Cálculo do tempo de aeração em função da temperatura inicial do grão para vários valores da umidade do grão ( $\theta_f = 15^\circ\text{C}$  e  $\varepsilon = 80\%$ )**

A umidade do grão é uma das grandezas mais importantes no cálculo do tempo de aeração. Recomenda-se que o grão saia do secador com a umidade padrão e que se utilize apenas a aeração para resfriá-lo, com a finalidade de armazená-lo com toda segurança, e que se faça a aeração de manutenção sempre que necessário. Utilizar ar natural

para reduzir a umidade do grão não é muito viável, pois o tempo de aeração será alto e, conseqüentemente, o consumo de energia será bem maior.

Observa-se, na Figura 24 que, quanto maior a umidade do grão, maior será o tempo de aeração para mantê-lo nestas condições. Este fenômeno já foi mencionado no comentário da Figura 23.

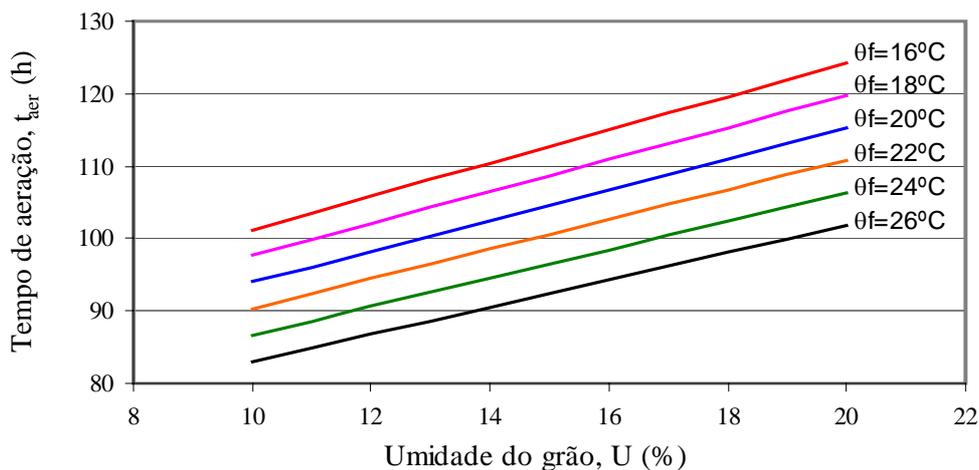


**Figura 24. Cálculo do tempo de aeração em função da umidade do grão utilizando o método convencional e o modelo para:  $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i = 30^\circ\text{C}$  e  $\varepsilon = 80\%$**

Uma vez que a umidade padrão comercial é de 13 a 14%, analisando o comportamento do processo de aeração através da Figura 24, pode-se observar o quanto maior deveria ser o tempo de aeração, se a umidade fosse maior que a padrão.

Resultados obtidos com o modelo aproximam-se muito dos obtidos com o método convencional. As pequenas diferenças não são relevantes, da ordem de 2%, mostrando que o modelo desenvolvido é capaz de calcular o tempo de aeração em função da umidade do grão, uma das variáveis mais sensíveis no processo de aeração.

A Figura 25 mostra o cálculo do tempo de aeração em função da umidade do grão, para vários valores da temperatura final do grão.

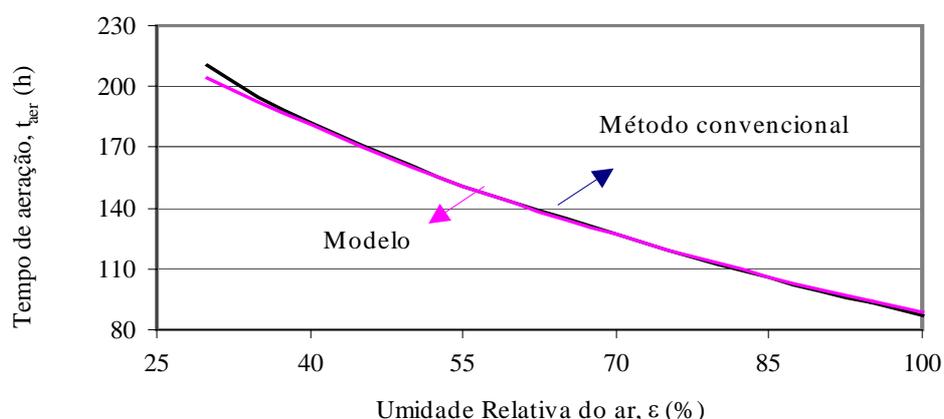


**Figura 25.** Cálculo do tempo de aeração em função da umidade do grão para vários valores da temperatura final do grão ( $\theta_i = 30^\circ\text{C}$  e  $\varepsilon = 80\%$ )

Pode-se notar que, quanto menor for a temperatura final do grão, maior será o tempo de aeração. Este fenômeno é bem esperado. A família de curvas da Figura 25 mostra com clareza este comportamento do processo de aeração, uma vez que a temperatura final do grão é a temperatura desejada de armazenamento e varia conforme a região a onde está localizado o silo. No Brasil, para regiões frias, as temperaturas de armazenagem estão compreendidas entre  $15^\circ$  e  $20^\circ\text{C}$  e, nas regiões quentes, entre  $20^\circ$  e  $25^\circ\text{C}$ .

A umidade relativa do ar é, de certa forma, a grandeza mais difícil de se considerar num processo de aeração. Ao longo do período de aeração, que pode incluir dias e noites, podem ocorrer grandes variações. Durante o dia o ar é mais quente e a umidade é mais baixa e, à noite, é mais fresco, com umidade mais elevada. Assim, deve-se considerar,

para fins de aeração, as médias dos dias e das noites ao longo dos períodos do ano. No entanto, o modelo desenvolvido tem a capacidade de, a todo momento, recalculer o tempo de aeração em função da temperatura e umidade relativa do ar externo. A Figura 26 mostra o cálculo do tempo de aeração em função da umidade relativa do ar externo.

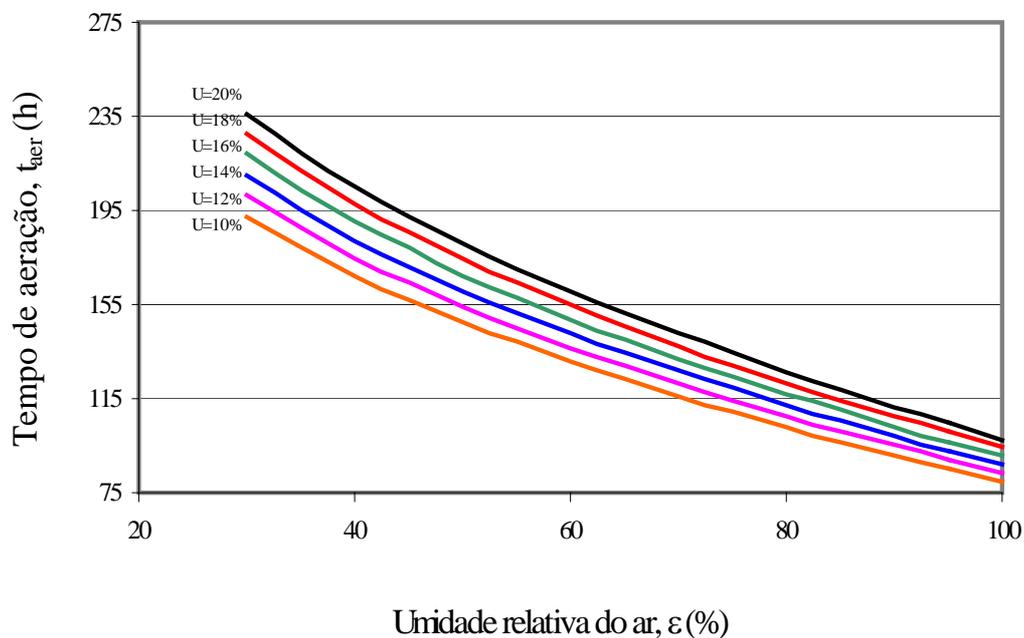


**Figura 26. Cálculo do tempo de aeração em função da umidade relativa do ar utilizando o método convencional e o modelo para:  $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ ,  $U = 14\%$  e  $\theta_{ar} = 20^\circ\text{C}$**

Observa-se que, quanto maior a umidade relativa do ar, menor será o tempo de aeração. Aqui supõe-se que a aeração seja possível, ou seja, mesmo o ar apresentando umidade relativa elevada, se a diferença entre a temperatura do grão e do ar estiver entre  $5^\circ$  a  $8^\circ\text{C}$ , com o ar mais frio que o grão, a aeração pode ser conduzida sem que haja o perigo de reumidecer o grão. O mesmo se aplica na situação inversa, ou seja, se o ar estiver com baixa umidade e a diferença de temperatura entre  $1^\circ$  e  $3^\circ\text{C}$ , não há perigo de super secagem. Assim, o ar mais úmido facilita a troca de calor entre ele e o grão, fazendo com que a temperatura do grão seja reduzida mais rapidamente. No entanto, o ar mais seco tem dificuldades em trocar calor com o grão, demandando um maior tempo de aeração.

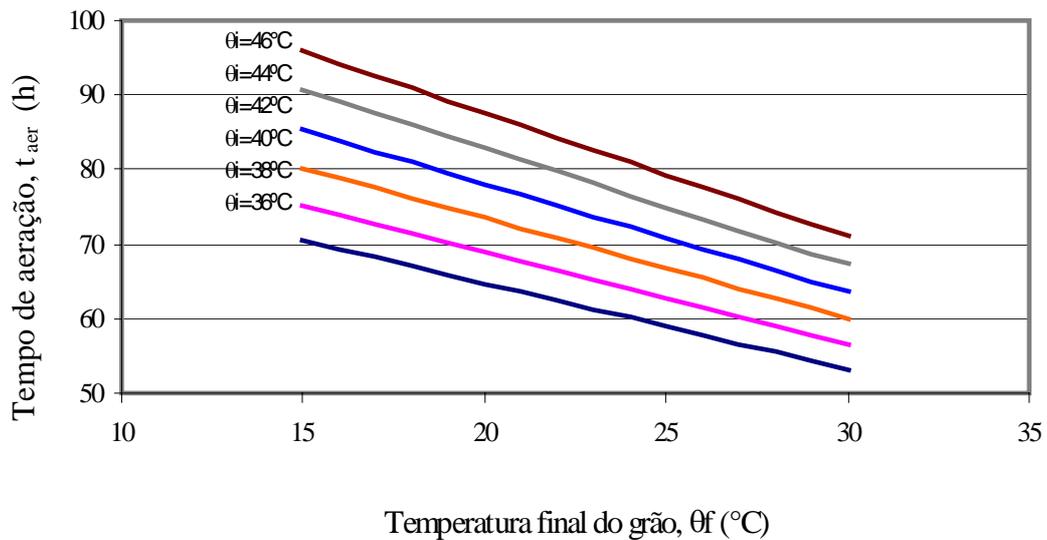
O modelo desenvolvido comporta-se muito bem para o cálculo do tempo de aeração em função da umidade relativa do ar. As pequenas diferenças observadas nas extremidades das curvas são consequência da forma de cálculo do modelo e da construção da tabela que representa o comportamento do processo de aeração, segundo o Quadro 3 de (5.2.1.6).

Na Figura 27, apresenta-se o cálculo do tempo de aeração em função da umidade relativa do ar para vários valores da umidade do grão. A família de curvas obtidas mostra que, quanto maior for a umidade do grão, maior será o tempo de aeração. Este fato se deve ao objetivo da aeração que é reduzir a temperatura do grão, por exemplo, de 30° para 15°C. Quanto maior a umidade do grão, a troca de calor entre o grão e o ar é menor.



**Figura 27.** Cálculo do tempo de aeração em função da umidade relativa do ar para vários valores da umidade do grão ( $\theta_i = 30^\circ\text{C}$  e  $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ )

Na Figura 28, apresenta-se o cálculo do tempo de aeração em função da temperatura final do grão para vários valores da temperatura inicial. A família de curvas obtidas mostra que, quanto maior a temperatura inicial, maior será o tempo de aeração.



**Figura 28.** Cálculo do tempo de aeração em função da temperatura final do grão para vários valores da temperatura inicial ( $U = 14\%$  e  $\varepsilon = 80\%$ )

## 6.2 Modelo fuzzy para a condução racional da aeração

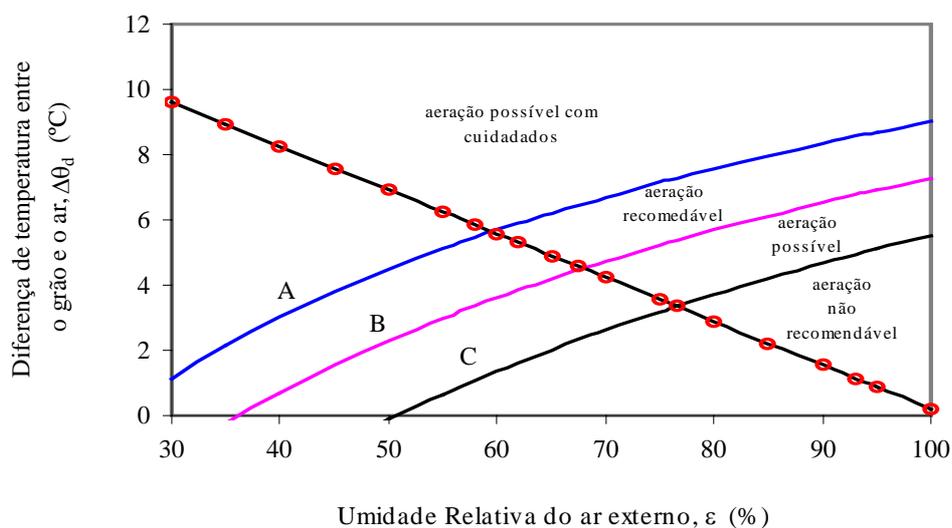
O modelo matemático desenvolvido em (5.2.2), trata da condução racional da aeração, ou seja, é a parte do modelo que verifica a possibilidade de realizar ou não a aeração, em função da diferença de temperatura entre o grão e o ar externo ( $\Delta\theta_a$ ) e da umidade relativa do ar externo ( $\varepsilon$ ). Para verificar sua eficiência foram feitas várias simulações.

É importante salientar que, ao se fornecem as informações necessárias ao modelo, que são a umidade relativa e a temperatura do ar externo e a temperatura inicial do

grão, o modelo analisa os dados e fornece como resposta uma das situações previstas no “Diagrama de Condução da Aeração”, desenvolvido pelo “Instituto Técnico de Cereais e Forragens”, com a vantagem de fornecer, também, a porcentagem de precisão da escolha de uma das situações possíveis.

A Figura 29 apresenta o resultado de uma das simulações realizadas, com as seguintes condições iniciais para a massa de grãos (trigo) armazenada: temperatura final do grão  $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ , temperatura inicial do grão  $\theta_i = 30^\circ\text{C}$  e umidade do grão  $U = 14\%$ . A reta mostrada na Figura 29 representa a simulação realizada quando são variadas a umidade relativa e a temperatura do ar externo de 30 a 100% e de  $20^\circ$  a  $30^\circ\text{C}$ , respectivamente.

Os pontos assinalados na reta da Figura 29, foram estrategicamente escolhidos e localizados em todas as regiões do diagrama, principalmente aqueles próximos às curvas “A”, “B” e “C”, as quais delimitam as regiões de aeração, para comprovar a eficiência do modelo.



**Figura 29. Simulação da condução racional da aeração utilizando o método convencional e o modelo para  $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i = 30^\circ\text{C}$  e  $U = 14\%$**

O Quadro 12 representa o resultado da simulação mostrada na Figura 29 e compara os resultados com os obtidos através do método convencional. Nele estão as situações previstas no “*Diagrama de Condução da Aeração*”, traduzidas por símbolos adotados no modelo. São elas: C = aeração possível com cuidados; R = aeração recomendável; P = aeração possível e N = aeração não recomendável.

Quadro 12. Comparação entre o método convencional e o modelo desenvolvido para a condução racional da aeração ( $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i = 30^\circ\text{C}$  e  $U = 14\%$ ).

Umidade Relativa do ar	Diferença de temperatura entre o grão e o ar	Condução da aeração $\Psi$	Porcentagem de precisão (%)	Condução da aeração
$\varepsilon$ (%)	$\Delta\theta_d$ ( $^\circ\text{C}$ )	Modelo	Modelo	Método Convencional
30	9,6	C	100	C
35	8,9	C	100	C
40	8,3	C	100	C
45	7,6	C	100	C
50	6,9	C	100	C
55	6,2	C	100	C
58	5,8	C	62	C
60	5,6	R	60	R
62	5,3	R	100	R
65	4,9	R	100	R
67,5	4,6	R	70	R
70	4,2	P	100	P
75	3,6	P	100	P
76,6	3,3	P	56	P
80	2,9	N	80	N
85	2,2	N	100	N
90	1,5	N	100	N
93	1,1	N	100	N
95	0,9	N	100	N
100	0,2	N	100	N

Analisando-se este quadro, pode-se notar que praticamente não há diferença entre o método convencional e o modelo desenvolvido, a não ser pelo fato de que o modelo é capaz de fornecer um índice (porcentagem) de aproximação, quando a situação encontra-se próxima da mudança de uma região de aeração para outra.

A vantagem do modelo desenvolvido é a possibilidade de ser implementado através de um programa computacional em conjunto com um sistema de acionamento e controle, onde não haverá a necessidade do operador consultar o “*Diagrama de Condução da Aeração*” para tomar a decisão de aerar. O próprio sistema se incumbem de iniciar ou não o processo. Para que isso seja possível é necessário que o sistema seja totalmente instrumentado com as medições de temperatura e umidade, levadas ao computador através de uma placa de aquisição de dados.

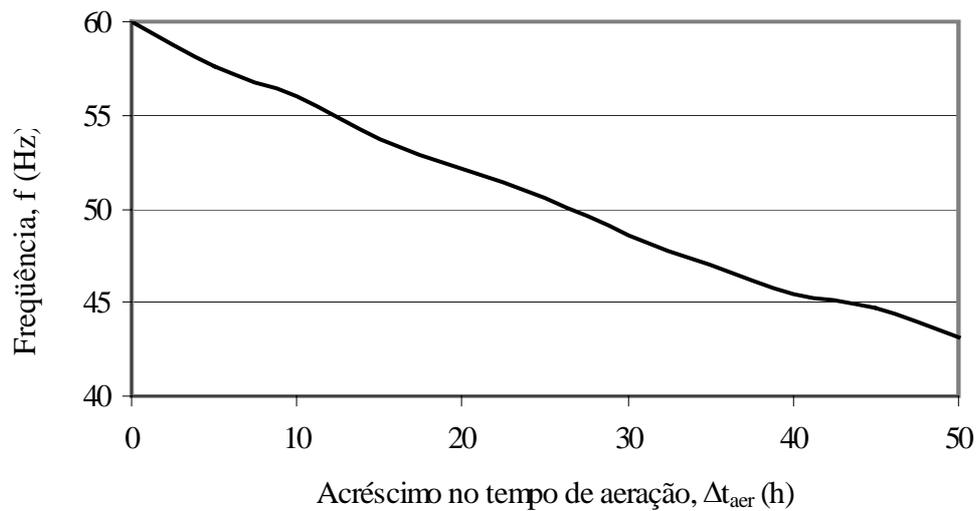
Uma forma de operação mais simples, utilizando-se o modelo desenvolvido, seria aquela em que o operador fornecesse os dados necessários via teclado do computador e este forneceria a resposta para iniciar ou não o processo.

O sistema poderia, ainda, estar interligado a uma estação meteorológica e a redes de sensores de termostatos e umidistatos, oriundos das células de armazenamento, para que, a qualquer momento, o operador consultasse o computador para saber da possibilidade de aerar ou não, sem nem mesmo ter de colher as informações necessárias e fornecê-las ao computador.

A temperatura e umidade relativa do ar externo que será insuflada dentro da célula não é constante ao longo de um período de aeração, podendo sofrer grandes variações e, portanto, uma situação prevista pode não ser a mesma horas depois. Contudo, o modelo pode ser capaz adequar-se a estas situações.

### 6.3 Modelo fuzzy para obtenção da frequência

Na Figura 30, apresenta-se o cálculo da frequência em função do acréscimo no tempo de aeração.



**Figura 30.** Cálculo da frequência em função do acréscimo no tempo de aeração utilizando o modelo para  $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ ,  $U = 14\%$ ,  $\varepsilon = 80\%$  e  $t_{aer} = 112$  horas

Na simulação apresentada, supõe-se que a massa de grãos deverá ser armazenada com uma temperatura final  $\theta_f = 15^\circ\text{C}$  e umidade de  $U = 14\%$ . Admiti-se que a temperatura inicial do grão atinja  $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ , ou seja, por algum motivo a massa de grãos sofreu um aquecimento e, portanto, deve ser aerada para retornar as condições iniciais.

O tempo de aeração necessário para tal condição é, então, calculado pelo modelo, obtendo-se o valor  $t_{aer} = 112$  horas, para a temperatura média do ar externo  $\theta_{ar} = 25^\circ\text{C}$  e sua umidade relativa média de  $\varepsilon = 80\%$ , quando o motor de indução opera com

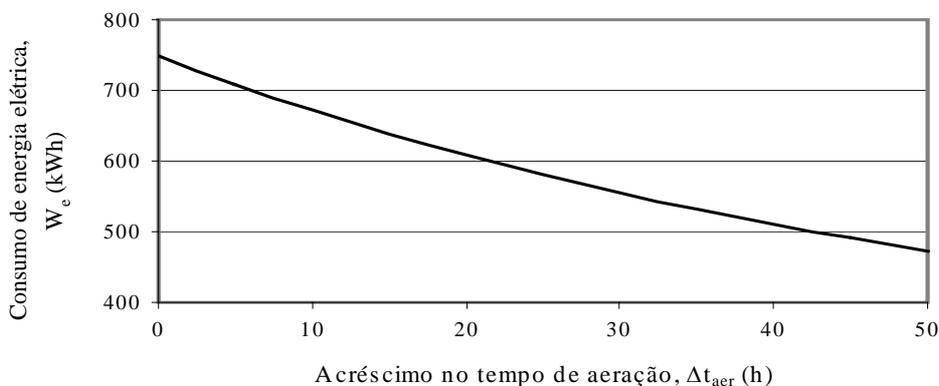
frequência nominal de 60Hz. Para esta situação, o consumo de energia elétrica é de 751,4kWh, a vazão total é de 5100m<sup>3</sup>/h e a perda de carga igual a 382,7mmca.

Conhecido o tempo de aeração de referência, o operador poderá optar em aumentar o tempo de aeração, por exemplo, em mais 25 horas, com o objetivo de reduzir o consumo de energia elétrica. Uma vez definido qual será o acréscimo no tempo de aeração, automaticamente, o modelo calculará a frequência necessária para que isso aconteça, que, no caso, seria  $f=50,5\text{Hz}$ .

A finalidade de reduzir a frequência é a redução do consumo de energia elétrica. A redução da frequência através do conversor proporciona uma redução da velocidade do motor, o que provoca uma grande redução da potência elétrica absorvida da rede de alimentação, fazendo com que ocorra uma expressiva redução no consumo de energia elétrica.

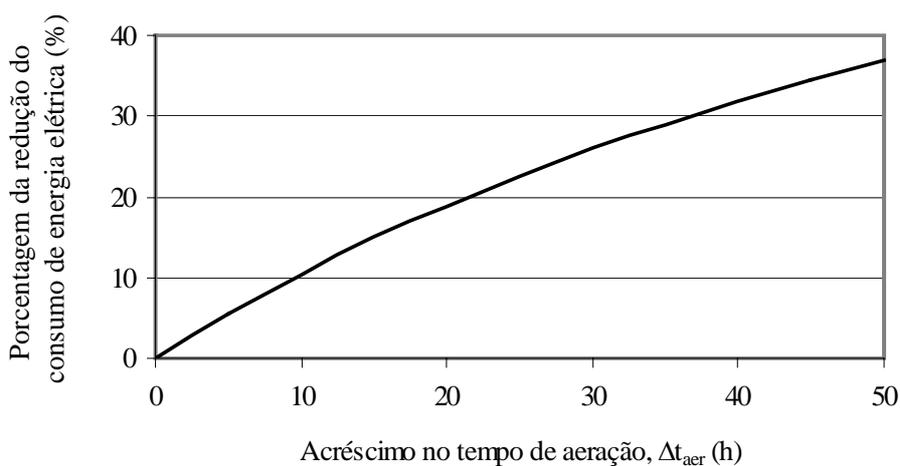
É importante ressaltar que, aumentar o tempo de aeração com a finalidade de reduzir o consumo de energia elétrica, depende das necessidades e prioridades de cada operador.

Na Figura 31, apresenta-se o consumo de energia elétrica em função do acréscimo no tempo de aeração. Quanto maior o acréscimo no tempo de aeração, menor poderá ser a frequência da tensão do motor de indução e, conseqüentemente, menor o consumo de energia elétrica. Este fato vem comprovar as análises realizadas em (4.5) e (4.6), quando foram apresentadas as leis de proporcionalidade do motor e do ventilador.



**Figura 31. Consumo de energia elétrica em função do acréscimo no tempo de aeração para  $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ ,  $U = 14\%$  e  $\varepsilon = 80\%$**

Comparativamente, a Figura 32 mostra a porcentagem de economia do consumo de energia elétrica em função do acréscimo no tempo de aeração. Observa-se que, quanto maior o acréscimo no tempo de aeração, significativos índices de economia do consumo de energia elétrica são obtidos. Para a simulação descrita anteriormente, um acréscimo de 25 horas acarretará em uma economia de 22,58% no consumo de energia elétrica. O Quadro 13 resume a simulação apresentada.

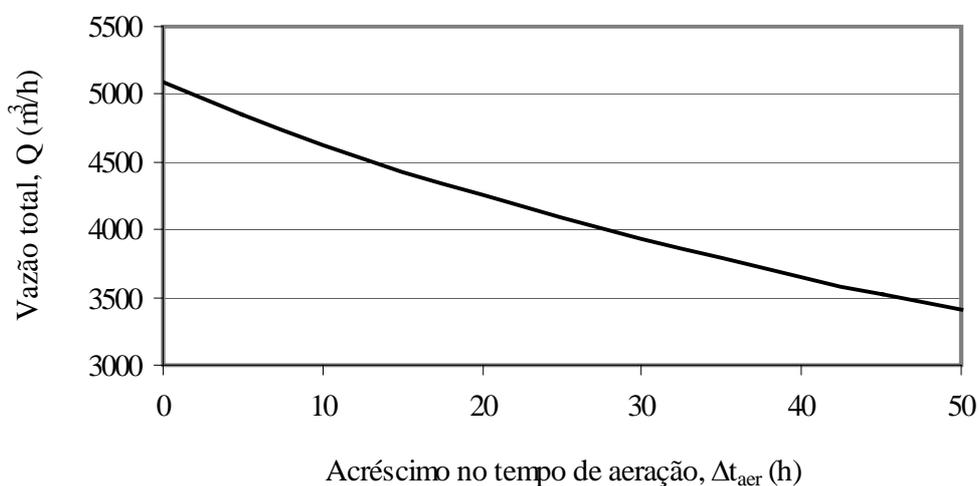


**Figura 32. Porcentagem da redução do consumo de energia elétrica em função do acréscimo no tempo de aeração para  $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ ,  $U = 14\%$  e  $\varepsilon = 80\%$**

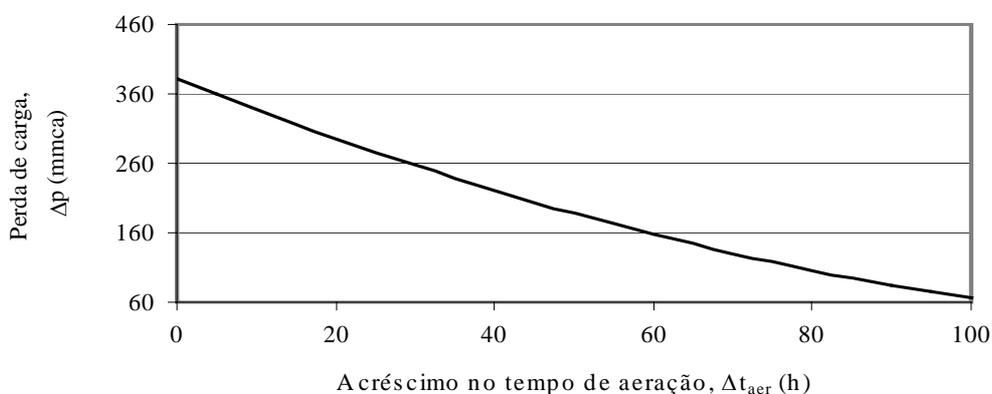
Quadro 13. Resultados da simulação apresentada.

Acréscimo no tempo de aeração]	Tempo de aeração	Frequência	Consumo de energia elétrica	Vazão Total	Perda de carga
$\Delta t_{aer}$ (h)	$t_{aer}$ (h)	$f$ (Hz)	$We$ (kWh)	$Q$ ( $m^3/h$ )	$\Delta p$ (mmca)
0	112	60	751,4	5100	382,2
25	137	50,5	581,7	4087	275,8
	Percentual de acréscimo 22,32%	Percentual de redução 15,83%	Percentual de redução 22,58%	Percentual de redução 19,86%	Percentual de redução 27,84%

A seguir, apresentam-se as Figuras 33 e 34, mostrando o comportamento da vazão total e da perda de carga, respectivamente, ambas em função do acréscimo no tempo de aeração, as quais vêm completar a simulação apresentada no Quadro 13.



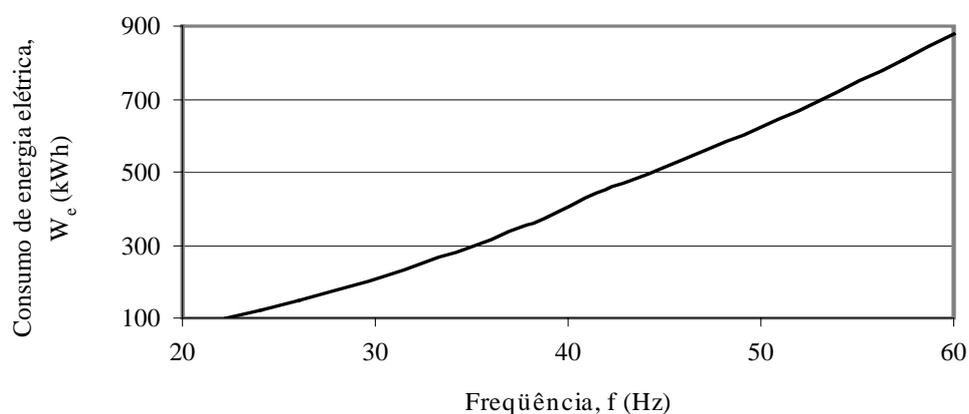
**Figura 33. Vazão total em função do acréscimo no tempo de aeração para  $\theta_f=15^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ ,  $U = 14\%$  e  $\varepsilon = 80\%$**



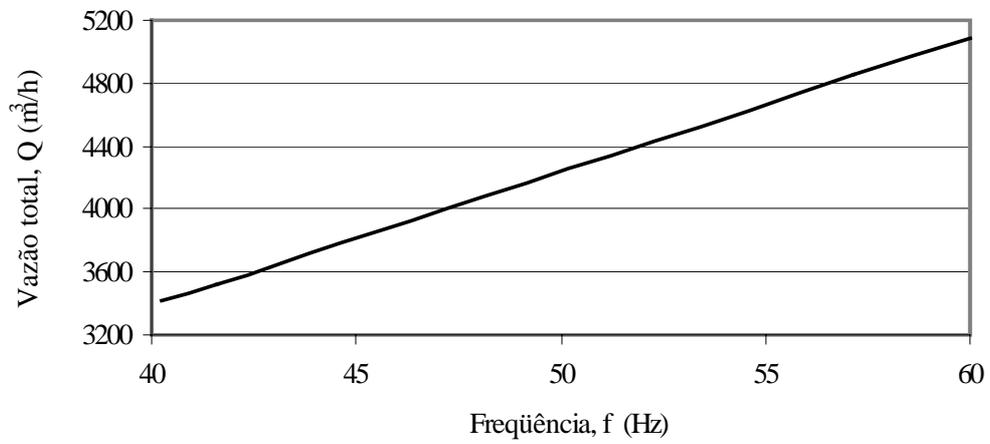
**Figura 34.** Perda de carga em função do acréscimo no tempo de aeração para  $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ ,  $U = 14\%$  e  $\varepsilon = 80\%$

O acréscimo no tempo de aeração é obtido com a redução da frequência. Uma vez reduzida a frequência, ocorrerá a redução das outras grandezas que influenciam no funcionamento do sistema, como a vazão total, a potência mecânica, a potência elétrica, a perda de carga e o consumo de energia elétrica.

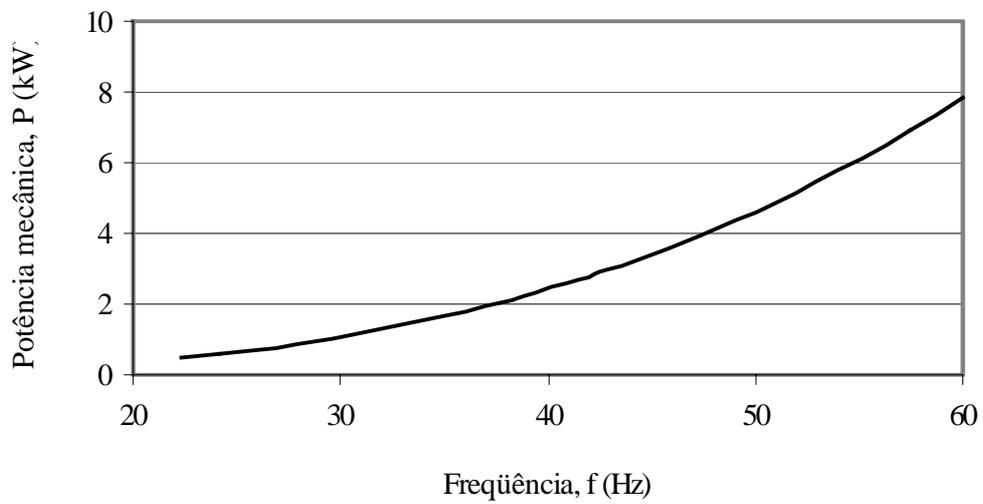
As Figuras 35 a 39, todas em função da frequência, ilustram a afirmação acima e, através delas, é possível observar o comportamento do sistema de aeração que envolve, basicamente, o conjunto motor-ventilador.



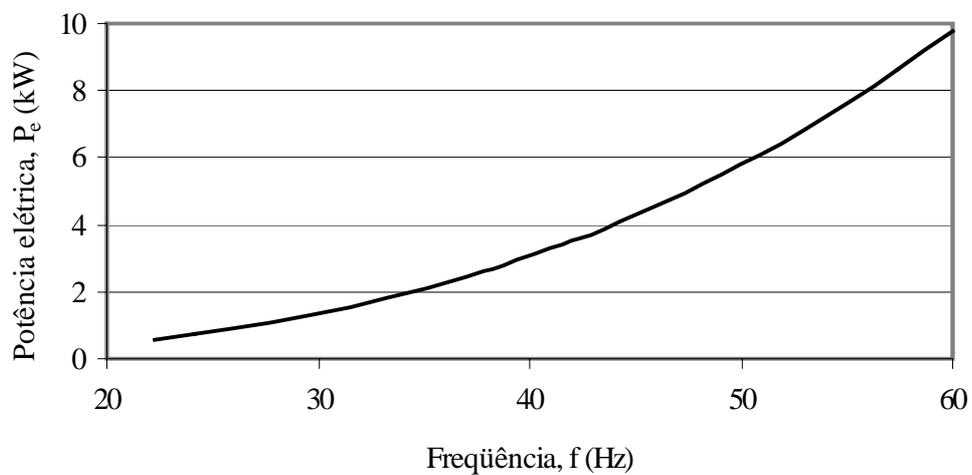
**Figura 35.** Consumo de energia elétrica em função da frequência para  $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ ,  $U = 14\%$  e  $\varepsilon = 80\%$



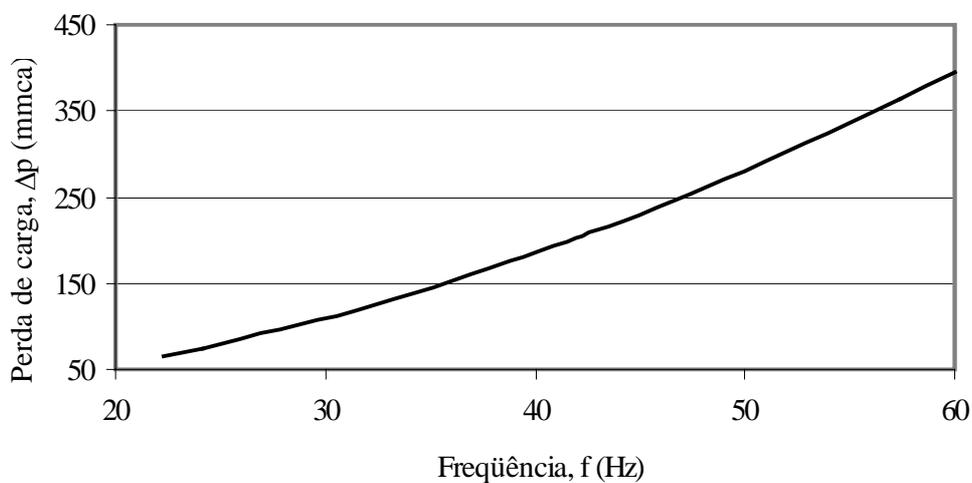
**Figura 36.** Vazão total em função da frequência para  $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ ,  $U = 14\%$  e  $\varepsilon = 80\%$



**Figura 37.** Potência mecânica em função da frequência para  $\theta_f = 15^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i = 30^\circ\text{C}$ ,  $U = 14\%$  e  $\varepsilon = 80\%$



**Figura 38.** Potência elétrica em função da frequência para  $\theta_f=15^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i=30^\circ\text{C}$ ,  $U=14\%$  e  $\varepsilon=80\%$



**Figura 39.** Perda de carga em função da frequência para  $\theta_f=15^\circ\text{C}$ ,  $\theta_i=30^\circ\text{C}$ ,  $U=14\%$  e  $\varepsilon=80\%$

## 8 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDREAS, J. C. *Energy-efficient electric motors-selection and application*. 2.ed. New York: Marcel Dekker, 1992, 272p.

BARBOSA, V. B. *Aplicação da lógica fuzzy no controle de um motor cc*. São José dos Campos: 1º ENCITA, Instituto Tecnológico da Aeronáutica, 1995. 127p.

BOSE, B. K. “Expert system, fuzzy logic, and neural networks in power electronics and drives,” *Power Electronics and Variable Frequency Drives*, IEEE Press, NJ: 1996, pp. 559-627.

BURREL, N. J. *Aeration systems*. London Road: Ministry of Agriculture, Fisheries and Food, 1973. 45p.

CHANG, C. L. Interpretation and execution of fuzzy programs. In:\_\_. *Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes*. New York: Academic Press, 1974. p.191-218.

CHANG, S. S. L. On risk and decision making in a fuzzy environment. In:\_\_. Zadeh, L. A. et al. *Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes*. New York: Academic Press, Inc., 1974, p. 219-226.

CRUZ, L. F. *Sistematizações da teoria fuzzy*. Rio Claro, 1996. 72p. Dissertação (Mestrado em Matemática/Fundamentos da Matemática) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

DE BEER, A. G. *Drying and storing agricultural products on farm*. Farming in South África, [s. 1.], p.29-68, 1972.

DOLL, T. R. *Potencial de economia de energia através de acionamentos estáticos aplicados a sistemas de variação de volume de ar*. Reliance Eletrica Ltda, p.1-7, 1989. (Relatório técnico).

FEITOSA, H . A. *Princípios fundamentais da teoria fuzzy*. Rio Claro, 1992. 89p. Dissertação (Mestrado em Matemática/Fundamentos da Matemática) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista.

GONÇALVES, V. A. *Desenvolvimento de um sistema computacional para o controle automático do processo de aeração de grãos de milho*. Botucatu, 1992. 174p. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

GUILLEMIN, P. Fuzzy logic applied to motor control. In: INTERNATIONAL APPLIANCE INDUSTRY TECHNICAL CONFERENCE, 1995, Madison. *IEEE Transactions on industry applications*. Rousset: SGS-Thomson Microelectronics, 1996. v.32, n.1, p.51-6.

LASSERAN, J. C. *Aeração de grãos*. Viçosa: CENTREINAR, 1981, 131p.

METZGER, J. F. *Aeration of stored wheat in the Canadian Prairies*. Winnipeg: Universidade de Manitoba, 1980. 159p. Tese (Mestrado) – Universidade de Manitoba.

PUZZI, D. *Conservação dos grãos armazenados*. São Paulo: Editora Agrônômica Ceres, 1973. 405p.

PUZZI, D. Abastecimento e armazenagem de grãos. *Grãos - Armazenagem*. Campinas, SP: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1986. p. 355-432.

ROSSI, S.J., ROA, G. *Secagem e armazenamento de produtos agropecuários com uso de energia solar*. BRASIL. Secretaria da Indústria, Comércio, Ciência e Tecnologia: ACIESP, n. 22, 1980, 295p.

SASSERON, J. L. *Aeração de grãos*. Viçosa: CENTREINAR, 1980, 54p.

SILVA, J. S. *Pré-processamento de produtos agrícolas*. Juiz de Fora: Instituto Maria, 1995, 500p.

TANAKA, K., MIZUMOTO, M. Fuzzy programs and their execution. In: \_\_. *Fuzzy sets and their applications to cognitive and decision processes*. New York: Academic Press, 1974. p.41-76.

ZADEH, L. A. *Fuzzy sets and applications*. USA: John Wiley & Sons, 1987. 684p.