

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

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AERAÇÃO DE SILOS DE
ARMAZENAGEM DE GRÃOS, UTILIZANDO INVERSORES DE FREQUÊNCIA

ANÍSIO NETO DA SILVA JÚNIOR

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

BOTUCATU-SP
Dezembro – 2004

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

EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AERAÇÃO DE SILOS DE
ARMAZENAGEM DE GRÃOS, UTILIZANDO INVERSORES DE FREQUÊNCIA

ANÍSIO NETO DA SILVA JÚNIOR

Orientador: Prof. Dr. José Angelo Cagnon

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

BOTUCATU-SP
Dezembro – 2004

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

S586e Silva Júnior, Anísio Neto da, 1958-
Eficiência em sistemas de aeração de silos de
armazenagem de grãos, utilizando inversores de frequência
/ Anísio Neto da Silva Júnior. -- Botucatu, [s.n.], 2004.
xii, 132 f. : il. color., gráfs., tabs.

Tese (Doutorado) -- Universidade Estadual Paulista,
Faculdade de Ciências Agronômicas.
Orientador: José Ângelo Cagnon.
Inclui bibliografia.

1. Grãos - Armazenamento 2. Motores elétricos de indução
3. Silos - Ventilação 4. Inversores elétricos 5. Energia
- Consumo I. Cagnon, José Ângelo. II. Universidade Estadual
Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu).
Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

CDD 633.10468

Palavras-chave: Grãos - Aeração; Eficiência energética; Sistema
de comando e controle

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

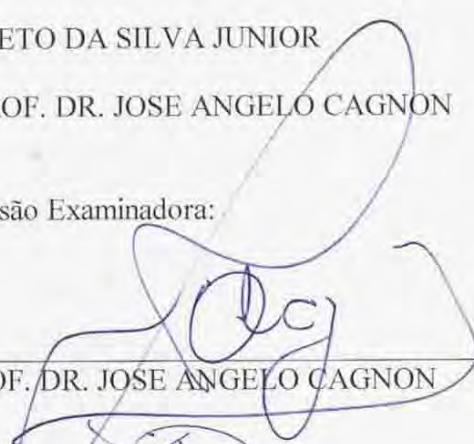
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO: "EFICIÊNCIA ENERGÉTICA EM SISTEMAS DE AERAÇÃO DE SILOS
DE ARMAZENAGEM DE GRÃOS, UTILIZANDO INVERSORES DE
FREQUÊNCIA"**

ALUNO: ANÍSIO NETO DA SILVA JUNIOR

ORIENTADOR: PROF. DR. JOSE ANGELO CAGNON

Aprovado pela Comissão Examinadora:



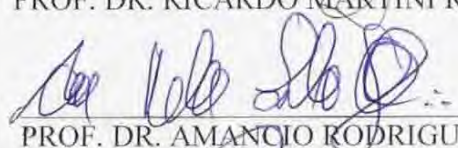
PROF. DR. JOSE ANGELO CAGNON



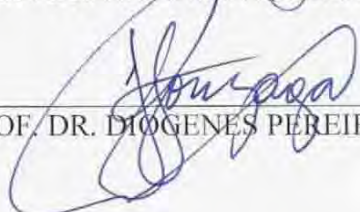
PROF. DR. IVO REIS FONTES



PROF. DR. RICARDO MARTINI RODRIGUES



PROF. DR. AMANCIO RODRIGUES DA SILVA JUNIOR



PROF. DR. DIOGENES PÉREIRA GONZAGA

Data da Realização: 17 de dezembro de 2004.

À memória de meus pais
Anísio e Aparecida

À minha esposa
Elde

À minha filha
Carol

Aos meninos
Júnior, Régis e Felipe

Ao bebê Fernando

dedico este trabalho

AGRADECIMENTOS

A Deus e à espiritualidade superior pela inspiração.

Ao Prof. Dr. José Ângelo Cagnon, pela orientação na condução desta pesquisa.

A José Leori Gardin e Márcio Luiz Batista da Silva, da empresa Indústria de Produtos Dallas Ltda, pela boa vontade e colaboração no desenvolvimento deste trabalho.

Aos amigos Éule, Beбето, Paulo Leão, Adauto, Andrei, Jorge Renck, Fátima Penko, Jair e Félix pela amizade e apoio em várias etapas deste experimento.

Ao Prof. Dr. Amâncio Rodrigues da Silva Júnior e aos integrantes do Laboratório de Eficiência Energética da UFMS, em especial Adailton e Saulo, pelo auxílio na medição dos dados.

Aos professores e funcionários do Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Ciências Agrônômicas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – Campus de Botucatu – SP, em especial ao Prof. Dr. Odivaldo José Seraphim.

SUMÁRIO

1	RESUMO	1
2	INTRODUÇÃO.....	5
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
3.1	Fluxograma do Cereal	9
3.1.1	Migração de Umidade	10
3.1.2	Higroscopia dos Grãos	12
3.1.3	Velocidade do Equilíbrio Higroscópico	13
3.2	Aeração.....	15
3.2.1	Aspiração e Insuflação.....	16
3.2.2	Classificação da Aeração.....	17
3.3	Condução da Aeração.....	21
3.4	Aeração Computadorizada	24
3.4.1	Controlador Automático para Aeração de Grãos	25
3.5	Sistema de Aeração	27
3.5.1	Silos	28
3.5.2	Dutos.....	29
3.5.3	Ventiladores.....	29
3.5.4	Seleção de Ventiladores	31
3.5.5	Curvas Características dos Ventiladores	36
3.6	Tempo de Resfriamento de uma Célula de Grãos	38
3.7	Consumo de Energia Elétrica para Aeração	42
3.7.1	Redução do Consumo de Energia Elétrica em Função das Características de Operação do Ventilador.....	43
3.7.2	Motor de Indução	45
3.7.3	Funcionamento do Inversor de Frequência	48
3.7.4	Controle Escalar dos Inversores de Frequência.....	51
3.7.5	Instalação de Inversores de Frequência	51

3.7.6	Aplicação de Acionamentos com Motores de Indução e Inversores de Freqüência	53
3.7.7	Curva de Carga e Demanda.....	53
3.8	Tarifação de Energia Elétrica	56
4	MATERIAIS E MÉTODOS	59
4.1	Caracterização do Sistema de Armazenagem de Grãos	59
4.2	Sistema de Termometria.....	62
4.3	<i>Software</i> MAEV2000 – Versão 2.....	66
4.4	Caracterização do Experimento.....	67
4.4.1	Controle de Velocidade do Aerador	69
4.5	Medições de Parâmetros Elétricos.....	71
4.6	Medição e Análise de Dados de Termometria.....	73
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	74
5.1	Tempo de Aeração de Resfriamento	76
5.2	Consumo de Energia Elétrica	82
5.2.1	Consumo de Energia Elétrica por Período de Aeração	87
5.2.1.1	Resultados obtidos – Silo 11 (60Hz) e silo 12 (48Hz) - Período de 25/03/2004 a 02/06/2004.....	87
5.2.1.2	Resultados obtidos – silo 11 (60Hz) e silo 12 (45Hz) - período de 03/06/2004 a 22/07/2004.....	92
5.2.1.3	Resultados obtidos – silo 11 (60Hz) e silo 12 (40Hz) - período de 23/07/04 a 20/08/2004	98
5.2.1.4	Resultados obtidos – Silo 11 (60Hz) e silo 12 (35Hz) - período de 21/08/04 a 22/10/04.....	103
5.2.1.5	Consolidação dos Resultados Obtidos.....	108
5.3	Resultados de Simulações para Conservação de Outros Grãos.....	108
5.3.1	Resultados obtidos – simulação para milho com umidade de até 14%	109
5.3.2	Resultados obtidos – simulação para arroz com umidade de até 14%	110
5.3.3	Resultados obtidos – simulação para trigo com umidade de até 14%	111
5.3.4	Consolidação dos Resultados de Simulações para Outros Grãos.....	112

6	CONCLUSÃO.....	114
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	118
8	APÊNDICES	121
8.1	Curvas de Carga – 60Hz (1765rpm).....	121
8.2	Curvas de Carga – 48Hz (1405rpm).....	124
8.3	Curvas de Carga – 45Hz (1315rpm).....	127
8.4	Curvas de Carga – 40Hz (1165rpm).....	128
8.5	Curvas de Carga – 35Hz (1015rpm).....	128
8.6	Curvas de Carga – 60Hz (1765rpm) - a vazio	131
8.7	Medição de Tensão.....	131
8.8	Fator de Potência 60Hz (1765rpm)	132
8.9	Fator de Potência 48Hz (1405rpm)	132

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de respiração do grão.....	10
Figura 2 - Migração vertical ascendente de umidade - inverno	11
Figura 3 - Migração vertical descendente de umidade - verão.....	11
Figura 4 - Curva de equilíbrio ar-trigo a 20°C	21
Figura 5 - Diagrama de condução da aeração.....	23
Figura 6 - Controle automático de aeração.....	25
Figura 7 - Silo metálico, plano, vertical - conservação de grãos.....	28
Figura 8 - Silo metálico, plano, vertical - secador de grãos	29
Figura 9 - Ventilador axial.....	30
Figura 10 - Ventilador centrífugo.....	30
Figura 11 - Resistência oferecida pelos grãos à passagem do ar.....	33
Figura 12 - Pressão e potência do motor para aerar grãos de soja.....	34
Figura 13 – Pressão e potência do motor para aerar grãos de milho	35
Figura 14 – Pressão potência do motor para aerar grãos de trigo.....	35
Figura 15 - Normalização para obtenção de curvas características de ventiladores	37
Figura 16 – Características de desempenho de um ventilador RLS -710.....	38
Figura 17 - Curvas características de desempenho de um ventilador RLS -710.....	38
Figura 18 - Propagação da zona de resfriamento	39
Figura 19 - Características de um ventilador centrífugo em função da velocidade do motor...44	44
Figura 20 - Pressão x vazão em função da variação de velocidade em um ventilador	45
Figura 21 – Curvas características – torque e corrente x velocidade	47
Figura 22 - Torque x velocidade	48
Figura 23 - Diagrama esquemático de um inversor de frequência.	49
Figura 24 - Configuração interna de um inversor de frequência.....	49
Figura 25 - Geração de onda senoidal	50
Figura 26 - Definição de demanda	54
Figura 27 - Curva de carga	55
Figura 28 – Silos planos metálicos verticais	60

Figura 29 - Aerador (conjunto motor-ventilador)	60
Figura 30 - Quadro de proteção e comando dos motores de aeração	61
Figura 31 - Medidor de umidade	62
Figura 32 - Diagrama de ligação dos cabos de termometria	63
Figura 33 - Localização dos sensores de temperatura no interior dos silos	64
Figura 34 - Estação meteorológica com sensor de chuva.....	65
Figura 35 - <i>Software</i> AIRMASTER 2002	66
Figura 36 - <i>Software</i> MAEV2000	67
Figura 37 - Ligações dos analisadores de energia e inversor de frequência.....	68
Figura 38 - Inversor de frequência, modelo CFW-09.....	69
Figura 39 - Diagrama unifilar - alimentação dos aeradores	71
Figura 40 - Analisador de energia, modelo RE-2000.....	72
Figura 41 - Temperatura no interior do silo 11 - 28/03/04 - 21:00h	75
Figura 42 - Temperatura no interior do silo 12 - 28/03/04 - 21:00h	75
Figura 43 - Curva de desempenho do ventilador RLS-710 - 60Hz (1.765rpm).....	77
Figura 44 - Curva de carga do aerador do silo 11 - 60Hz, medição em 30/03/04.....	83
Figura 45 - Curva de carga do aerador do silo 12 - 48Hz, medição em 28/03/04	85
Figura 46 - Curva de carga do aerador do silo 12 - 45Hz, medição em 25/06/04.....	85
Figura 47 - Curva de carga do aerador do silo 12 - 40Hz, medição em 13/08/04	86
Figura 48 - Curva de carga do aerador do silo 12 - 35Hz, medição em 25/09/04	86
Figura 49 - Temperatura e umidade do ar externo - período de 25/03/04 a 02/06/04	87
Figura 50 - Temperatura do grão e temperatura ambiente - 09:00h - 25/03/04 a 02/06/04	88
Figura 51 - Temperatura do grão e temperatura ambiente - 21:00h - 25/03/04 a 02/06/04	89
Figura 52 - Funcionamento dos aeradores dos silos 11 e 12 - 25/03/04 a 02/06/04.....	90
Figura 53 - Consumo de energia elétrica nos silos 11 e 12 - 25/03/04 a 02/06/04.....	90
Figura 54 - Temperatura no interior do silo 11 - 02/06/04 - 21:00h	91
Figura 55 - Temperatura no interior do silo 12 - 02/06/04 - 21:00h	92
Figura 56 - Temperatura e umidade do ar externo - período de 03/06/04 a 22/07/04	93
Figura 57 - Temperatura do grão e temperatura ambiente - 09:00h - 03/06/04 a 22/07/04	94
Figura 58 - Temperatura do grão e temperatura ambiente - 21:00h - 03/06/04 a 22/07/04	94
Figura 59 - Funcionamento dos aeradores dos silos 11 e 12 - 03/06/04 a 22/07/04.....	95

Figura 60 - Consumo de energia elétrica nos silos 11 e 12 – 03/06/04 a 22/07/04.....	96
Figura 61 - Temperatura no interior do silo 11 – 22/07/04 – 21:00h.....	97
Figura 62 - Temperatura no interior do silo 12 – 22/07/04 – 21:00h.....	97
Figura 63 - Temperatura e umidade do ar externo – período de 23/07/04 a 20/08/04.....	98
Figura 64 - Temperatura do grão e temperatura ambiente – 09:00h – 23/07/04 a 20/08/04.....	99
Figura 65 - Temperatura do grão e temperatura ambiente – 21:00h – 23/07/04 a 20/08/04.....	99
Figura 66 - Funcionamento dos aeradores dos silos 11 e 12 – 23/07/04 a 20/08/04.....	100
Figura 67 - Consumo de energia elétrica nos silos 11 e 12 – 23/07/04 a 20/08/04.....	101
Figura 68 - Temperatura no interior do silo 11 – 20/08/04 – 21:00h.....	102
Figura 69 - Temperatura no interior do silo 12 – 20/08/04 – 21:00h.....	102
Figura 70 - Temperatura e umidade do ar externo – período de 21/08/04 a 22/10/04.....	103
Figura 71 - Temperatura do grão e temperatura ambiente – 09:00h – 21/08/04 a 22/10/04...	104
Figura 72 - Temperatura do grão e temperatura ambiente – 21:00h – 21/08/04 a 22/10/04...	105
Figura 73 - Funcionamento dos aeradores dos silos 11 e 12 – 21/08/04 a 22/10/04.....	105
Figura 74 - Consumo de energia elétrica nos silos 11 e 12 – 21/08/04 a 22/10/04.....	106
Figura 75 - Temperatura no interior do silo 11 – 22/10/04 – 21:00h.....	107
Figura 76 - Temperatura no interior do silo 12 – 22/10/04 – 21:00h.....	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Teor de umidade de equilíbrio do milho	12
Tabela 2 - Teor de umidade de equilíbrio da soja	13
Tabela 3 – Vazão específica para aeração em silos planos e elevados.....	19
Tabela 4 – Vazão específica para aeração de vários tipos de grãos e várias umidades.....	20
Tabela 5 – Recomendações de fluxos de ar para aeração.....	20
Tabela 6 – Constantes a e b para diversos produtos, equação (3).	34
Tabela 7 - Grupos de Consumidores	56
Tabela 8 – Característica de desempenho do ventilador RLS-710 – 60Hz	77
Tabela 9 – Característica de desempenho do ventilador RLS-710 – 48Hz	79
Tabela 10 – Característica de desempenho do ventilador RLS-710 – 45Hz	80
Tabela 11 – Característica de desempenho do ventilador RLS-710 – 40Hz	81
Tabela 12 – Característica de desempenho do ventilador RLS-710 – 35Hz	82
Tabela 13 - Parâmetros elétricos medidos - silo 11 (60Hz) – 25/03/04 a 22/10/2004.	83
Tabela 14 - Parâmetros elétricos medidos - silo 12 – 25/03/04 a 22/10/04.	84
Tabela 15 – Consolidação dos resultados obtidos no experimento – 25/03/04 a 22/10/04.....	108
Tabela 16 – Desempenho do ventilador RLS-710 - simulação para aeração de milho.....	109
Tabela 17 – Desempenho do ventilador RLS-710 - simulação para aeração de arroz.....	110
Tabela 18 – Desempenho do ventilador RLS-710 - simulação para aeração de trigo.....	112
Tabela 19 – Consolidação dos resultados de simulações efetuadas para milho.....	112
Tabela 20 – Consolidação dos resultados de simulações efetuadas para arroz.....	113
Tabela 21 – Consolidação dos resultados de simulações efetuadas para trigo.....	113

LISTA DE EQUAÇÕES

Equação (1) - Pressão total segundo Lasseran (1981).....	32
Equação (2) - Pressão total segundo Silva (2000).....	32
Equação (3) - Pressão equivalente à altura total da camada de grãos	33
Equação (4) - Potência do motor do sistema de aeração	36
Equação (5) - Tempo de resfriamento da massa de grãos para 1 ciclo	40
Equação (6) - Velocidade do ar	40
Equação (7) - Velocidade de propagação da zona de resfriamento.....	40
Equação (8) - Tempo de aeração segundo Lasseran (1981).....	41
Equação (9) - Tempo de aeração segundo Silva (2000).....	41
Equação (10) - Potência elétrica.....	42
Equação (11) - Energia elétrica consumida.....	42
Equação (12) - Ventiladores centrífugos: vazão x velocidade	43
Equação (13) - Ventiladores centrífugos: pressão total x velocidade	43
Equação (14) - Ventiladores centrífugos: potência x velocidade	43
Equação (15) - Velocidade do motor de indução	45
Equação (16) - Demanda	53
Equação (17) - Demanda reativa	54
Equação (18) - Demanda aparente.....	54
Equação (19) - Energia consumida.....	54
Equação (20) - Energia total consumida.....	55
Equação (21) - Demanda média	55

1 RESUMO

O presente trabalho teve por objetivo determinar o potencial de economia de energia elétrica nos sistemas de aeração de silos verticais a partir da implementação de controle eletrônico de velocidade do motor do aerador utilizando inversor de frequência. O experimento foi montado no setor de armazenamento de grãos da empresa Indústria de Produtos Dalls Ltda, na cidade de Nova Alvorada do Sul (MS), no período de 25/03/04 a 22/10/04, sendo utilizados dois silos contendo, cada um, 5.000m³ de soja a 13,5% de umidade, aqui denominados “silo 11” e “silo 12”. O sistema de aeração, em ambos os silos, era composto por um motor de indução com as especificações de 30cv, 4 polos, 380V, 60Hz, 1.765rpm, e ventilador com rotor de pás retas, inclinadas para trás, com característica de consumo de energia elétrica constante para uma mesma velocidade de rotação.

O silo 11 foi definido como silo padrão e o aerador funcionou em 60Hz (1.765rpm) durante todo o período do experimento. O aerador do silo 12, cuja implementação de controle de velocidade foi efetuada por um inversor de frequência, esteve ajustado para funcionamento em quatro estágios, 48Hz (1.405rpm), 45Hz (1.315rpm), 40Hz (1.165rpm) e 35Hz (1.015rpm). O parâmetro utilizado para a definição da frequência (rotação)

de cada estágio foi a vazão específica básica de ar ($0,08\text{m}^3/\text{min.m}^3$), recomendada pela Kleper Weber Industrial para aeração em silos planos e elevados, para grãos comerciais com umidade de até 14%.

Os dados de temperatura no interior dos silos e os de temperatura e umidade do ar externo foram coletados através de sensores que alimentavam *software* de gerenciamento e controle automático de aeração existente na empresa e que, a partir de programação pré-estabelecida, determinava o momento de ligar/desligar os aeradores. Considerando a rotação dos aeradores em cada estágio de frequência e utilizando-se do *software* MAEV-2000, foram obtidas as características de desempenho dos ventiladores em todos os períodos do experimento. Esses dados, além de permitirem a determinação da vazão específica de ar para aeração, foram utilizados para determinar o tempo de resfriamento da massa de grãos para cada estágio de frequência. Dados de potência ativa, reativa e aparente, bem como tensão e demanda, foram coletados a partir de analisadores de energia, instalados nos circuitos de alimentação elétrica dos silos. Os resultados assim obtidos possibilitaram a determinação do consumo de energia elétrica por período de aeração, para conservação de grãos de soja, em ambos os silos. Através da comparação de resultados foi possível determinar o potencial de redução no consumo de energia elétrica, quando se utiliza controle de velocidade para adequação de aeradores às exigências do grão e do processo de aeração.

Os percentuais de redução no consumo de energia elétrica obtidos foram de 38,5% para 48Hz (1.405rpm), 48,62% para 45Hz(1.315rpm), 69,53% para 40Hz (1.165rpm) e 74,63% para 35Hz (1.015rpm), enquanto que a temperatura média da massa de grãos oscilou entre 20 e 24°C, com umidade permanecendo em torno de 13,5%.

Outro benefício deste trabalho é o de contribuir com parâmetros reais, adequados ao desenvolvimento e incremento de *softwares* para controle automático de aeração, viabilizando sua implantação através de uma relação custo/benefício em níveis mais aceitáveis.

ENERGETIC EFFICIENCY IN AERATION SYSTEMS OF SILOS FOR GRAIN STORAGE WITH THE USE OF FREQUENCY INVERTERS.

Botucatu, 2004, 132p.

Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura) – Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP.

Author: ANÍSIO NETO DA SILVA JÚNIOR

Adviser: JOSÉ ANGELO CAGNON

SUMMARY

This work had the objective of determining the potential of economy of electric energy in the aeration systems of vertical silos through the implementation of electronic control of speed in the aerator engine, using a frequency inverter. The experiment was carried out in the grain storage sector at Produtos Dallas Ltda in Nova Alvorada do Sul (MS) in the period of 25/03/04 and 22/10/04. Two silos have been used, each one with 5.000 m³ of soy bean with 13.3 of humidity, named “silo 11” and “silo 12”. The aeration system in both silos was composed of an induction engine with the specifications of 30cv, 4 poles, 380V, 60Hz, 1765 rpm, and of a ventilator with the following characteristics: a straight-shafted rotor, the shafts inclined backwards and a steady consumption of electric energy for the same rotation speed.

Silo 11 was defined as the pattern silo and the aerator worked at 60Hz (1765 rpm) during the whole period of the experiment. The aerator of silo 12, whose implementation of speed control was made by a frequency inverter, was adjusted to work in four stages: 48Hz (1.405rpm), 45Hz (1.315rpm), 40Hz (1.165rpm) and 35Hz (1.015rpm). The parameter used to define frequency (rotation) of each stage was the basic specific air release (0,08m³ of air/min/m³grains), recommended by Kleper Weber Industrial for aeration in plain vertical silos, for commercial grains with humidity up to 14%.

The data concerning the temperature inside the silos, the external temperature and the air humidity were collected through the sensors that fed the management software existing in the factory that, in turn, controlled automatically the aeration and, following a pre-arranged programming, determined the time to turn on/turn off the aerators.

Considering the rotation of the aerators in each stage of frequency and making use of the software MAEV-2000, the features of aerator performance in all periods of the experiment were obtained. These data, besides allowing to determine the specific air release for aeration, could be used to determine the time of cooling of the grain mass in each stage of frequency. Data of active, reactive and apparent power, as well as tension and demand, were collected from these energy analyzers, installed in the circuits of electrical feeding of the silos and the results enabled the determination of the electric energy consumption per periods of aeration, for the preservation of the grains in both silos. Comparing the results, it was possible to determine the potential of reduction in the consumption of electric energy when a control of speed is used to suit the aerators to the grain demand and to the process of aeration.

The percentages of reduction in the consumption of electric energy were 38,5% for 48Hz (1.405rpm), 48,62% for 45Hz(1.315rpm), 69,58% for 40Hz (1.165rpm) and 74,63% for 35Hz (1.015rpm), whereas the average temperature of grain mass varied between 20 and 24 °C and the humidity remained at about 13,5%.

Another benefit of this work is the contribution with real parameters, suitable to the development of softwares for the automatic control of aeration, making it possible its application in a more acceptable cost-benefit basis.

Keywords: Frequency Inverter, Grain Storage, Energetic Efficiency, Automatic Control of Aeration.

2 INTRODUÇÃO

Os grãos, como materiais biológicos vivos, estão sujeitos a transformações de naturezas distintas, decorrentes da tecnologia aplicada ao sistema de pré-processamento, principalmente a secagem e armazenagem.

A técnica da aeração, que consiste na passagem forçada do ar com fluxo adequado, através da massa de grãos ensilada, pode, se bem empregada, solucionar problemas de conservação, apresentando como vantagem a possibilidade de supervisionar tanto o sistema quanto o produto durante o processo de aeração.

O resfriamento da massa de grãos constitui o principal objetivo e utilidade da aeração, já que o microclima formado dentro dessa massa traz vários benefícios ao processo de conservação, tais como a inibição da atividade de insetos e microflora, preservação da qualidade dos grãos, remoção de odores, secagem, entre outros.

Em regiões tropicais, onde não é possível a obtenção de ar frio, a aeração deve ser usada com cuidado, considerando-se que em alguns casos podem ser obtidos resultados negativos. Entretanto, vários trabalhos experimentais foram realizados em países de

clima quente, tais como Austrália e Israel, e o benefício da aeração tem sido amplamente constatado na prática (Puzzi, 1973).

Nos Estados Unidos e Europa, a aeração é empregada desde o início da década de 40 e hoje é utilizada em praticamente todos os países produtores de grãos, com técnicas de controle avançadas e equipamentos modernos, fazendo desse sistema o ponto mais importante no projeto de um silo.

Em função dos custos elevados, poucas empresas que operam com armazenagem de grãos no Brasil possuem sistemas de gerenciamento de controle de aeração informatizado e automatizado, não obstante tais sistemas apresentarem grande vantagem sobre a operação manual.

Para proceder à aeração é necessário, inicialmente, definir sua finalidade, ou seja, se para manutenção, correção, resfriamento ou secagem. Devem ser monitoradas, basicamente, temperatura e umidade relativa do ar externo, temperatura e umidade do grão, além de observadas as recomendações específicas de vazão de ar requeridas pelo produto armazenado.

Segundo Lasseran (1981), as vazões específicas recomendadas à aeração de manutenção devem ser suficientemente baixas, evitando-se a secagem ou reumedecimento excessivo do produto.

Os dados de temperatura e umidade relativa do ar externo são coletados a partir de estação meteorológica, localizada junto aos armazenadores. Para controle da temperatura e umidade na massa de grãos, empregam-se instalações de termometria que são constituídas por redes de sensores dispostos de forma regular dentro dos silos. Essas informações permitem ao operador ligar ou desligar os ventiladores, conforme a necessidade.

O ventilador é a máquina utilizada para movimentar o ar através dos grãos, sendo dimensionado em função da vazão de ar requerida e pressão estática estabelecida pela massa de grãos.

Nos processos de aeração, os ventiladores do tipo centrífugo são os mais utilizados e, historicamente, têm sido acionados por motores de indução, operando com velocidade e frequência praticamente constantes, desperdiçando energia sempre que não necessitam operar à plena carga.

Através da variação de velocidade do motor é possível controlar a vazão de ar e a pressão estática, permitindo aumento da eficiência energética do conjunto motor-ventilador, adequando-o ao tipo e volume de grão armazenado. Segundo Cruz (2001), a redução da vazão não pode ser efetuada de qualquer maneira, mas com critérios, sujeita a um limite mínimo e com a constante monitoração de temperatura e umidade da massa de grãos.

Durante muitos anos, as aplicações industriais de velocidade variável foram ditadas pelos requisitos dos processos e limitadas pela tecnologia, pelo custo, pela eficiência e pelos requisitos de manutenção dos componentes empregados.

Os sistemas mais utilizados para variação de velocidade foram, por muito tempo, implementados com motores de indução de velocidade fixa como o primeiro dispositivo de conversão de energia elétrica para energia mecânica e, para obtenção de velocidade variável, o sistema necessitava de um segundo dispositivo de conversão de energia que utilizasse componentes mecânicos, hidráulicos ou elétricos.

Com o desenvolvimento dos semicondutores de potência de excelentes características de desempenho e confiabilidade, foi possível a implementação de sistemas de variação de velocidade eletrônicos e com isso, melhorar o desempenho de máquinas devido à adaptação da velocidade nos requisitos do processo.

Esses dispositivos eletrônicos para variação de velocidade de motores de indução são conhecidos como inversores de frequência. Conforme Andréas (1992), os inversores têm a característica de fornecer tensão e frequência variáveis a partir de uma fonte de alimentação com tensão e frequência constantes.

Segundo Lopes et al.(2000) e Silva (2000), existe um grande potencial de economia de energia elétrica nas unidades armazenadoras de grãos e poucos são os estudos sobre utilização de inversores de frequência visando tal economia e automação no processo de aeração.

Considerando a escassez de energia elétrica, a elevação significativa dos custos dessa energia e, ainda, o aumento na demanda de armazenamento de grãos no país, cujo consumo energético constitui parcela significativa dos custos, o objetivo deste trabalho foi determinar o potencial de economia de energia elétrica nos sistemas de aeração de silos verticais, a partir da implementação do controle de velocidade do motor do aerador, utilizando inversor de frequência.

Além da economia de energia elétrica assim obtida, outros benefícios podem advir do processo de controle proposto por este trabalho, tais como:

- redução de custo para conservação de grãos;
- redução de demanda de energia elétrica;
- partidas e paradas suaves dos motores;
- redução de manutenção dos motores.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Fluxograma do Cereal

Em uma unidade armazenadora os grãos são recebidos na moega e através de elevadores passam por máquinas de pré-limpeza, secador e em seguida são armazenados em silos. Os silos são células individualizadas, construídas de chapas metálicas, concreto ou alvenaria, dotadas de controles termométricos, aeração e expurgo - condições básicas para a preservação da qualidade dos grãos por períodos prolongados.

Na armazenagem é de fundamental importância o conhecimento dos dados de temperatura e umidade relativa do grão, e temperatura e umidade relativa do ar, pois dependendo das condições do ambiente e do produto, a utilização adequada da técnica de aeração estabelecerá condições que permitirão o resfriamento de pontos aquecidos, a uniformização da temperatura na massa de grãos, a regulação do estado de umidade do produto, a remoção de odores, além de promover a secagem ou a umidificação.

Os grãos oleaginosos, destinados à produção de óleo e torta para ração, quando armazenados em más condições podem sofrer carbonização, aumento de acidez, escurecimento e modificações organolépticas (sabor e odor).

3.1.1 Migração de Umidade

Ao respirar, o grão absorve oxigênio ao mesmo tempo em que libera calor, umidade e anidrido carbônico, sendo este processo acompanhado de perda de substância. A respiração não aumenta apenas a perda de substância mas conduz, ainda, através da elevação da temperatura da massa de grãos, a ações microbianas que podem provocar danos graves e irreversíveis. Convém salientar que o processo de respiração, Figura 1, acelera por si próprio pois a umidade absorvida, associada ao processo de elevação de temperatura, eleva o conteúdo de água do grão, sendo este aumento provocado pela intensidade da respiração. A umidade e o calor resultantes deste processo criarão condições favoráveis ao crescimento de mofo, com a deterioração iniciando-se em questão de horas.



Figura 1 - Processo de respiração do grão

No inverno, o ar frio e denso situado junto à parede do silo gera um fluxo de ar que circulará em seu interior, de cima para baixo. Simultaneamente, o ar existente entre os grãos, no fundo e centro do silo, absorve calor dos grãos quentes, fazendo com que o ar suba. A combinação do fluxo de ar frio e denso próximo às paredes com o fluxo de ar quente que sobe no centro do silo, faz o ar circular. A essa circulação de ar denomina-se "corrente de ar de convecção".

Subindo pela parte central da massa de grãos, o ar aquecido absorve a umidade dos grãos armazenados; quando se aproxima da superfície da massa armazenada, a umidade se condensa no grão frio da superfície, gerando ali uma zona de alto teor de umidade e uma crosta de grãos em deterioração. Mesmo em grãos com teores de umidade seguros, de

10% a 13%, a migração de umidade ocorre de forma natural em sistemas de armazenagem convencionais.

Assim, a migração de umidade é a maior causadora dos danos que ocorrem ao grão estocado. A Figura 2 mostra a migração vertical ascendente de umidade, através de uma massa de grãos estocada num silo há vários meses, sem aeração e sob temperatura ambiente baixa.



Figura 2 - Migração vertical ascendente de umidade - inverno

Em clima quente ou verão, quando a temperatura ambiente é elevada, a migração de umidade se processa em sentido vertical descendente, conforme pode ser visto na Figura 3.

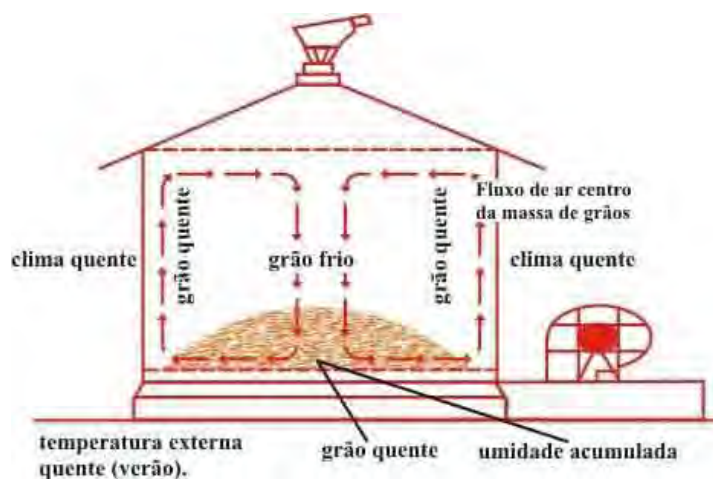


Figura 3 - Migração vertical descendente de umidade - verão

A migração de umidade favorece a atividade de fungos e insetos ao estabelecer condições propícias ao aumento da atividade de respiração dos grãos, através da multiplicação e crescimento de focos de aquecimento. Assim, umidade e temperatura devem ser mantidas uniformes e sob controle.

3.1.2 Higroscopia dos Grãos

A higroscopia dos grãos estuda a capacidade dos grãos em receber ou ceder umidade, as condições em que essa umidade se movimenta e o sentido em que ela se realiza, ou seja, do grão para o ar ou do ar para o grão. Grãos armazenados com 14% de umidade e secos durante a aeração para 12%, oferecerão um prejuízo de 2% ao produtor ou armazenador, por ocasião da comercialização. Em caso contrário, se de 13% a umidade fosse aumentada para 14,5%, por exemplo, no ato da entrega do produto comercializado poderia haver rejeição por excesso de água, ou se continuasse armazenado por um período prolongado, exigiria o acionamento mais freqüente da aeração para a boa conservação.

O ar intragranular, que representa aproximadamente 40% do volume do silo, tem sua umidade e temperatura alteradas através dos micromovimentos do ar, gerando inevitável alteração da umidade dos grãos. O equilíbrio higroscópico significa um balanceamento entre a temperatura e umidade do grão e a temperatura relativa do ar. Weber (2001). Para cada espécie de grão existe um equilíbrio higroscópico, as Tabelas 1 e 2 indicam os teores de umidade de equilíbrio higroscópico para grãos de milho e soja que se encontram a uma temperatura de 25°C, e para diversas temperaturas e umidades relativas do ar.

Tabela 1 - Teor de umidade de equilíbrio do milho

Temp. Ar (°C)	Teor de Umidade de Equilíbrio do Milho (%bu)												
	Umidade Relativa (%)												
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
16	9,2	9,9	10,5	11,2	11,8	12,5	13,2	14,0	14,8	15,7	16,7	18,0	19,7
18	9,0	9,7	10,3	11,0	11,6	12,3	13,0	13,8	14,6	15,5	16,6	17,9	19,5
20	8,8	9,5	10,1	10,8	11,5	12,1	12,8	13,6	14,4	15,3	16,4	17,7	19,4
22	8,6	9,3	10,0	10,6	11,3	12,0	12,7	13,4	14,3	15,2	16,2	17,5	19,2
24	8,5	9,1	9,8	10,4	11,1	11,8	12,5	13,3	14,1	15,0	16,1	17,4	19,1
26	8,3	8,9	9,6	10,3	10,9	11,6	12,3	13,1	13,9	14,9	15,9	17,2	19,0
28	8,1	8,8	9,4	10,1	10,8	11,5	12,2	12,9	13,8	14,7	15,8	17,1	18,8
30	7,9	8,6	9,3	9,9	10,6	11,3	12,0	12,8	13,6	14,6	15,6	17,0	18,7
32	7,8	8,4	9,1	9,8	10,5	11,1	11,9	12,6	13,5	14,4	15,5	16,8	16,6

Fonte: Weber (2001)

Tabela 2 - Teor de umidade de equilíbrio da soja

Temp. Ar (°C)	Teor de Umidade de Equilíbrio da Soja (%bu)												
	Umidade Relativa (%)												
	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80	85	90
16	5,8	6,6	7,5	8,3	9,2	10,0	10,9	11,9	12,9	14,1	15,4	17,0	19,1
18	5,7	6,5	7,4	8,2	9,1	9,9	10,8	11,8	12,8	14,0	15,3	16,9	19,0
20	6,6	6,4	7,3	8,1	9,0	9,8	10,7	11,7	12,8	13,9	15,2	16,9	16,0
22	5,4	6,3	7,2	8,0	8,9	9,7	10,7	11,6	12,7	13,8	15,2	16,8	18,9
24	5,3	6,2	7,1	7,9	8,8	9,6	10,6	11,5	12,6	13,7	15,1	16,7	18,8
26	5,2	6,1	7,0	7,8	8,7	9,6	10,5	11,4	12,5	13,7	15,0	16,6	18,7
28	5,1	6,0	6,9	7,7	8,6	9,5	10,4	11,3	12,4	13,6	14,9	16,6	18,6
30	5,0	5,9	6,8	7,6	8,5	9,4	10,3	11,3	12,3	13,5	14,8	16,5	18,6
32	4,9	5,8	6,7	7,5	8,4	9,3	10,2	11,2	12,2	13,4	14,8	16,4	18,5

Fonte: Weber (2001)

3.1.3 Velocidade do Equilíbrio Higroscópico

A velocidade com que se dá a secagem e a umidificação dos grãos, ou seja, em quantas horas ou dias os grãos cedem ou recebem umidade do ar até estarem em equilíbrio com ele, foi estudada em laboratório por Pixton e Warburton, citados por Puzzi (1973), no ano de 1968. Tal experimento foi efetuado com grãos de trigo em camada delgada de apenas um centímetro, numa estufa com ar à temperatura de 22,5°C e diversas umidades relativas, tendo como objetivo conhecer o tempo que levariam os grãos de trigo para, de uma umidade maior, entrarem em equilíbrio higroscópico com o ar, diminuindo a umidade; e de uma umidade menor, abaixo de 10%, entrarem em equilíbrio higroscópico com o ar, aumentando a umidade.

A partir desses e outros estudos, os pesquisadores chegaram às seguintes conclusões:

- a secagem dos grãos se dá com maior velocidade do que a absorção de umidade por eles;
- o tempo de secagem é de 5 dias, ao passo que o tempo de umidificação é de aproximadamente 15 dias;
- a umidificação dos grãos depois de secos é lenta e difícil, motivo pelo qual a umidificação na esteira, no momento da expedição, não dá resultado satisfatório e deve ser evitada.

Essa experiência de laboratório, com uma camada de apenas um centímetro, não permite concluir sobre o tempo real para se obter o equilíbrio higroscópico em camadas espessas, entretanto, fornece indicações importantes, especialmente quando se tem em mãos a responsabilidade de aeração de grãos.

Weber (2001) apresenta um exemplo prático da aplicação dos conhecimentos de higroscopia de grãos em milho armazenado a 13% de umidade que, através da termometria, tenha sido constatado aumento localizado de temperatura, atingindo 28°C e portanto, com necessidade de aeração. As condições do clima neste caso são as seguintes: noite com temperatura do ar igual a 16°C e umidade relativa do ar de 75%. Observando o Tabela 1, tem-se que a umidade de equilíbrio do milho nessas condições é de 15,7%. Assim, o ar em questão pode ser utilizado para a aeração? A resposta está baseada no confronto de duas situações:

- quanto à temperatura do ar, que é de 16°C, e a temperatura dos grãos, de 28°C - do ponto de vista da temperatura, a aeração é perfeitamente viável e as condições são ótimas pois existe uma diferença muito acentuada, de 12°C, entre a temperatura dos grãos e do ar ($28 - 16 = 12^\circ\text{C}$). Segundo Weber (2001), quando os grãos estiverem quentes e a diferença entre sua temperatura e a do ar for igual ou maior de 6°C, deverá ser efetuada a aeração;
- quanto à umidade do ar e dos grãos, a análise feita é sobre a higroscopicidade dos grãos. Observa-se, pelo Tabela 1, que nas condições do ar ambiente, a umidade de equilíbrio do milho tenderá a aumentar de 13% para 15,7%. Assim, umidade atual dos grãos seria adequada ao armazenamento e a comercialização? O que fazer, corre-se o risco de umedecer o milho ou mantêm-se os grãos com a temperatura elevada? A resposta será dada pela aeração, pelos seguintes motivos:
 - a temperatura do ar é boa e fará o necessário e indispensável resfriamento;
 - somente uma aeração muito prolongada poderá aumentar a umidade dos grãos;
 - a umidade do ar está alta por se tratar de horário noturno, ocasião em que a temperatura baixa faz com que suba a umidade relativa do ar.
 - amanhecendo o dia, a temperatura do ar se eleva e a umidade relativa diminui, podendo entrar na faixa de 60%. Verifica-se que a umidade de equilíbrio do milho

é modificada para 12,5%. Com temperatura e umidade do ar ainda mais baixas do que a da massa, não existe o risco de umedecimento dos grãos.

A análise criteriosa das condições do clima e da tabela higroscópica do grão vai determinar a execução da aeração. É conveniente lembrar que a secagem dos grãos, através da aeração, dá-se com relativa facilidade, enquanto que o umedecimento, com maior dificuldade.

3.2 Aeração

A aeração é a movimentação adequada do ar ambiente através da massa de grãos para melhorar as condições de armazenamento, segundo 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.

A aeração tem por objetivo a manutenção dos grãos armazenados, sem prejuízo da qualidade e da quantidade da massa armazenada, através de um sistema de ventilação mecânico. Dentre suas várias utilidades, as principais são:

- rebaixamento da temperatura e umidade dos grãos;
- controle de insetos e fungos;
- aplicação de fumigantes (expurgo);
- evitar as correntes de ar de convecção;
- evitar a transilagem, diminuindo os custos de armazenagem;
- evitar danos mecânicos;
- conservar as qualidades físicas e químicas dos grãos.

A aeração da massa de grãos ensilada tem dois efeitos simultâneos, com período de realização bastante diferenciado, sendo que num primeiro momento, relativamente curto, equilibra-se a temperatura do grão àquela do ar externo, podendo ainda ocasionar um abaixamento suplementar da temperatura do grão em relação à do 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 quanto em 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).

3.2.1 Aspiração e Insuflação

No sistema de aspiração, o fluxo de ar ambiente é aspirado de cima para baixo, entrando pelo alto do silo, passando pela massa de grãos e posteriormente, pelo ventilador.

As vantagens desse sistema são:

- a temperatura do ar que entra em contato com a massa de grãos é a mesma do ar ambiente, não sofrendo aquecimento devido ao trabalho mecânico (atrato) pela passagem através do ventilador e da tubulação;
- evita a condensação no telhado, durante a aeração noturna;
- facilita e acelera a aeração com finalidade de eliminar focos de calor que acaso existam na metade inferior do silo.

As desvantagens desse sistema são:

- as impurezas finas tendem a obstruir os furos e a passagem do ar nas chapas de cobertura dos canais de aeração;
- liberação de pó, odores e materiais finos próximos ao solo, promovendo a poluição do meio ambiente nas zonas de trabalho;
- não pode ser utilizada para aeração de resfriamento durante o enchimento do silo.

A insuflação, por outro lado, é o sistema de aeração mais utilizado e nesse caso, o ventilador insufla o ar ambiente externo, de baixo para cima.

As vantagens desse sistema são:

- permite aeração de resfriamento de grãos durante o enchimento do silo;
- facilita e acelera a remoção de focos de calor quando estes se localizarem na parte superior do silo;
- mantêm limpos, sem risco de entupimento, os furos da chapa perfurada de cobertura dos aerodutos;
- indicada para a execução de aeração secante.

As desvantagens desse sistema são:

- promove o aquecimento do ar antes de entrar em contato com os grãos, devido ao atrito com os condutos e, especialmente, com as partes móveis do ventilador, variando de 1°C a 2°C;
- há o aquecimento do ar na passagem pela massa de grãos, devido à pressão positiva de insuflação, que chega a 1°C para cada 100 mmca de pressão (Lasseran, 1981).

Segundo Lasseran (1981), a aeração por insuflação e por aspiração têm um limite que se encontra na faixa de pressão estática de 200 mmca. Abaixo disso, admite-se a insuflação e, acima, recomenda-se a aspiração.

3.2.2 Classificação da Aeração

Conforme a qualidade estratégica da armazenagem e de acordo com o projeto, a aeração pode ser classificada em quatro tipos distintos:

Aeração de manutenção: os grãos depositados no silo devem permanecer secos, frios e limpos, sendo essa a condição primeira e indispensável para o projeto de uma instalação de aeração de manutenção, que tem como finalidade neutralizar o aquecimento espontâneo dos grãos e as correntes de convecção que se formam devido às diferenças de temperatura na massa;

Aeração corretiva: é com certa facilidade que em determinado ponto da massa de grãos se verifica a elevação da temperatura acima do normal. Essa alteração pode ter como causas:

- local com elevada concentração de impurezas;
- foco de desenvolvimento acentuado de microorganismos;
- infiltração de umidade;
- acúmulo de finos e quebrados, impedindo a passagem de ar.

Sempre que for constatado um aumento de temperatura em alguns pontos, deve-se realizar a aeração. O acompanhamento diário da temperatura da massa é indispensável pois a aeração deverá ser realizada preventivamente, com disponibilidade de tempo para a seleção das melhores condições de clima. Em casos extremos de altas

temperaturas na massa, da ordem de 30°C, a aeração será realizada independentemente das condições do ar ambiente, mesmo com tempo chuvoso.

Eliminado o foco de aquecimento, far-se-á uma aeração de manutenção para homogeneizar, a uma mesma temperatura, toda a massa. A técnica de aeração corretiva, no que diz respeito à insuflação ou à aspiração do ar, dependerá da localização do foco de aquecimento.

Aeração de resfriamento: existem dois motivos pelos quais os grãos podem ser depositados nos silos com uma temperatura elevada, acima das indicadas para a boa conservação:

- os grãos, após passarem pelo secador onde secam e resfriam, mesmo “frios”, saem com temperatura de 5°C a 10°C acima da temperatura ambiente, o que é elevado, especialmente em dias quentes. Durante a pós-limpeza e ao longo do transporte, os grãos perdem alguns graus, porém precisam contar com a aeração de resfriamento. À noite, as temperaturas mais baixas do ar permitem ao secador descarregar grãos bem mais frios, o que pode propiciar temperatura adequada de armazenagem. Essa diversidade de temperatura de descarga dos grãos saindo dos secadores, forma camadas de grãos com diferentes temperaturas no interior do silo. Para a boa conservação, entretanto, necessária se faz uma massa fria e homogênea;
- o segundo motivo diz respeito à estratégia de secagem em que se utiliza o secador pelo sistema contínuo ou intermitente, com a secagem a corpo inteiro, sem resfriamento no secador. Nesse caso, os grãos saem quentes, sendo que o resfriamento deverá ser feito no silo, através de um sistema dimensionado para esse fim.

Aeração secante: uma unidade de armazenagem pode ser dotada de sistema especialmente projetado para realizar a secagem no próprio silo. Esse tipo de secagem vai exigir elevadas vazões de ar, em torno de 0,4 a 0,6 m³/min.m³, dependendo do produto (grãos), e o sistema será sempre por insuflação de ar.

Para cada tipo de aeração, para cada tipo de grão e para cada serviço que se pretenda, segundo a classificação anterior, seleciona-se um conjunto de ventiladores, canais, aerodutos e cobertura perfurada, de forma a permitir o uso da vazão específica adequada, tornando seguro o processo de armazenagem.

A vazão específica, expressa em m^3 de ar por hora e por m^3 de grão, é uma das grandezas mais importantes no processo da aeração. Ela é tabelada e recomendada em função do tipo de grão e finalidade da aeração. Por exemplo: as vazões a serem aplicadas às células destinadas à seca-aeração (“dryaeration”) do milho são de 30 a $60 \text{ m}^3/\text{h.m}^3$; 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 $10 \text{ m}^3/\text{h.m}^3$, como relata Lasseran (1981). As vazões específicas recomendadas à aeração de manutenção devem ser suficientemente baixas, evitando a secagem ou reumedecimento 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).

A Tabela 3 informa sobre a vazão específica para grãos comerciais e sementes armazenados com diversos teores de umidade. Verifica-se que a aeração de sementes é realizada com o dobro de vazão específica indicada para grãos comerciais.

Tabela 3 – Vazão específica para aeração em silos planos e elevados

Umidade do Produto	Vazão Específica ($\text{m}^3/\text{min.m}^3$)	
	Produto Comercial	Produto Semente
Até 14%	0,08	0,12
15%	0,10	0,16
16%	0,12	0,20
17%	0,16	0,40
18-19%	0,20	0,60
20%	0,40	-
21-22%	0,60	-

Fonte: Weber (2001)

Os grãos comerciais, secos com até 14% de umidade, exigem aeração de vazão mínima de apenas $0,08 \text{ m}^3/\text{min.m}^3$. Já o produto armazenado com umidade inicial da ordem de 20%, deverá contar com uma vazão específica alta, de $0,4 \text{ m}^3/\text{min.m}^3$. Tais sistemas de aeração secante somente poderão ser projetados e instalados para pleno funcionamento em

locais em que o clima, à época da safra, ofereça condições de baixa umidade relativa do ar e com silo que contenha fundo falso.

Segundo Weber (2001), a Tabela 4 também poderá ser utilizada quando se deseja um cálculo mais minucioso. Da tabela original de Lasseran, omitiu-se vazões para teores mais elevados de umidade, já que nessas situações, para aerar adequadamente, serão necessárias vazões específicas muito elevadas, inviabilizando o procedimento, sem risco de deterioração do produto.

Tabela 4 – Vazão específica para aeração de vários tipos de grãos e várias umidades

Grãos	Umidade (%)	Vazão Específica		
		m ³ /h.m ³	m ³ /min.m ³	m ³ /h.t
Trigo e cevada	14-16	55	0,083	6,66
	16-18	10	0,166	13,33
	18-20	20	0,333	26,66
Milho	14-16	7,5	0,125	10,00
	16-18	12	0,200	16,00
	18-20	25	0,416	33,33
	20-24	40	0,666	53,33
Colza	08-10	20	0,333	26,66
	10-12	40	0,666	53,33

Fonte: Weber (2001)

Segundo Silva (2000), antes de optar pelo uso de um sistema de aeração, deve-se avaliar as condições climáticas para atender aos objetivos propostos, principalmente quando se trata dos aspectos de conservação dos grãos durante a armazenagem. A Tabela 5 fornece indicação de alguns fluxos de ar para aeração.

Tabela 5 – Recomendações de fluxos de ar para aeração

Tipo de unidade/finalidade	Fluxo de ar (m ³ .min ⁻¹ .t ⁻¹ de grãos)	
	Região fria	Região quente
Horizontal / grão seco	0,05 a 0,10	0,10 a 0,20
Vertical / grão seco	0,02 a 0,05	0,03 a 0,10
Pulmão / grãos úmidos	0,30 a 0,60	0,30 a 0,60
Seca-aeração	0,50 a 1,00	0,50 a 1,00

Fonte: Silva (2000)

Todo o processo depende da seleção correta da vazão específica do ar e dos demais componentes da instalação, tais como canaletas e aerodutos dimensionados para a vazão desejada. Uma vez definida a vazão específica a ser utilizada, deve-se determinar a pressão a ser insuflada. Esta deverá ser igual à perda de carga total da instalação, expressa em pascal (pa) ou milímetros de coluna de água (mmca), e corresponderá 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.), devido ao tipo de grão e ao sistema de difusão (por fundo falso, duto central ou duto horizontal).

3.3 Condução da Aeração

Definida a finalidade, a aeração basicamente 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 a 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 4 mostra um exemplo da curva de equilíbrio entre o ar e o trigo.

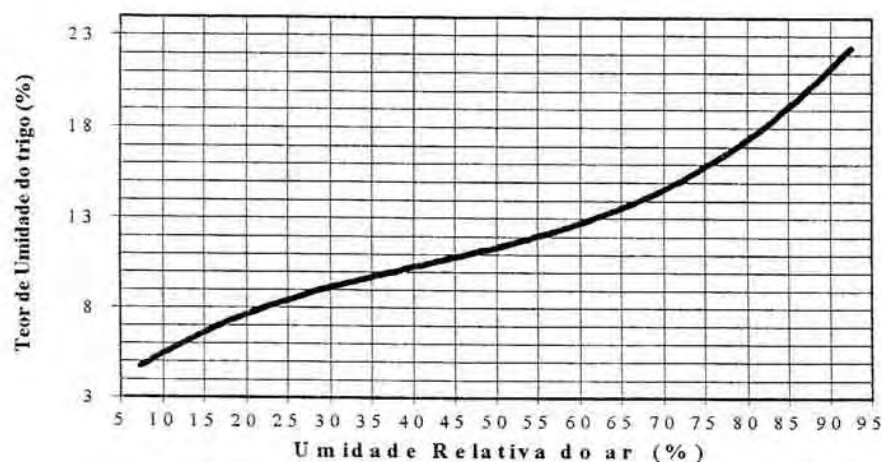


Figura 4 - Curva de equilíbrio ar-trigo a 20°C

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.

São várias as opiniões no que diz respeito ao momento adequado para se processar a aeração. Alguns pesquisadores aconselham a aeração sempre que a temperatura do ar externo for de 5°C a 8°C inferior à da porção mais quente do grão. Outros pensam que o intervalo da diferença de temperatura entre o ar e o grão deve ser de 5°C a 6°C. Outros, ainda, afirmam que a aeração é sempre possível quando a temperatura do ar externo for inferior à do grão, e existem aqueles que aconselham a aeração quando a temperatura do ar externo for 6°C inferior à temperatura do grão, entretanto, dependendo da umidade relativa do ar e da massa de grãos. Uma grande maioria, porém, afirma que para uma boa aeração, as diferenças de temperatura e umidade entre o ar e o grão devem pesar, conjuntamente, para a decisão final. De uma forma geral e 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; Sasseran, 1980; Lasseran, 1981; Puzzi, 1986 e 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 realizada.

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 esteja, pelo menos, 6°C inferior à 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 5 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 e que se aplica aos cereais cuja umidade se aproxima das normas.

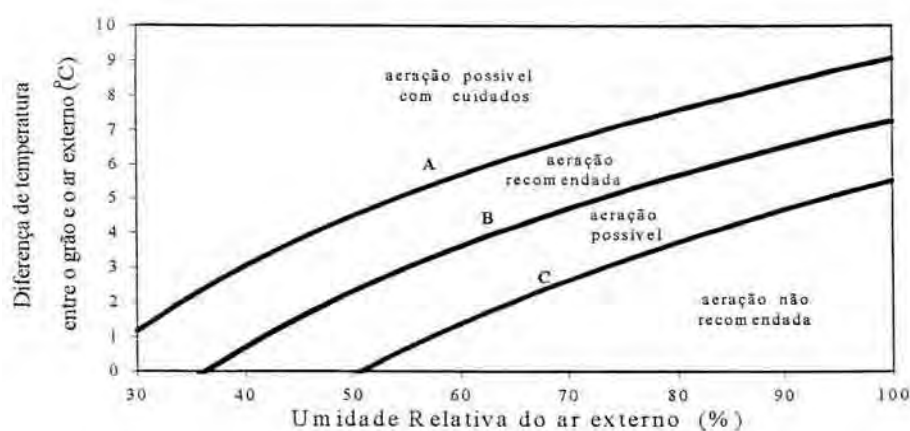


Figura 5 - Diagrama de condução da aeração

Segundo Lasseran (1981), esse diagrama resulta de uma construção teórica, com verificação na prática, cujos elementos de base foram:

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

Nesse diagrama, para a região superior à curva “A”, se a umidade relativa for baixa, haverá supersecagem da massa de grãos; se a umidade relativa for alta e a temperatura externa baixa, poderá ocorrer condensação. Nessa região, a aeração deverá feita apenas em caso de necessidade, de forma a ser preferível socorrer uma massa de grãos em deterioração, mesmo que esta venha a reumidecer ou supersecar.

Na região entre as curvas “A” e “B”, a aeração é recomendada; contudo, nos extremos desta região podem ocorrer os mesmos fenômenos descritos acima.

A região compreendida entre as curvas “B” e “C” permite aeração, porém, com cuidados para evitar umedecimento da massa de grãos.

Aerar nas condições compreendidas entre a curva “C” e os eixos, pode levar ao risco de umedecer os grãos. Portanto, a operação só deve ser efetuada em casos de grande necessidade.

Ainda sobre a Figura 5, Silva (2000), apresenta as seguintes considerações sobre o uso da aeração:

- para umidade relativa do ar superior a 90%, a aeração é recomendada somente nos casos em que a diferença de temperatura entre os grãos e o ar seja superior a 5°C;
- para umidade relativa do ar inferior ou igual a 60%, a aeração só é recomendada e aplicável em grãos úmidos ou que estejam aquecidos a uma temperatura superior à do ar, necessitando, assim, de resfriamento. Em outras situações poderá ocorrer supersecagem da massa;
- resfriamento inferior a 3°C torna a aeração desnecessária;
- resfriamento entre 3°C e 5 °C torna a aeração recomendável;
- resfriamento com gradiente de temperatura superior a 7°C torna a aeração possível, entretanto, pode provocar condensação do vapor de água na superfície da massa e nas paredes do silo.

3.4 Aeração Computadorizada

Atualmente existem sistemas de aeração controlados de forma manual onde, apenas através da monitoração da temperatura e umidade do grão armazenado, o operador aciona os ventiladores, deixando-os em funcionamento o tempo necessário para atingir a temperatura e a umidade desejadas, desligando-os em seguida. Controladores automáticos bem mais sofisticados também são utilizados com a mesma finalidade, entretanto em menor escala, dados o desconhecimento de tal tecnologia e seu maior custo.

Os controladores automáticos são equipados com termostatos e umidistatos, ambos acoplados a um painel de controle e 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 ligar ou desligar 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, sempre que necessário. Através de microcomputador, com terminal de vídeo e impressora disponível, registros de dados podem ser efetuados a todo instante, conforme descrevem Metzger (1980), Puzzi (1986) e Gonçalves (1992).

3.4.1 Controlador Automático para Aeração de Grãos

Segundo Weber (2001), o controlador automático para aeração de grãos é um sistema para controle da temperatura da massa de grãos, composto por um módulo controlador (interface), um microcomputador, uma estação meteorológica e termometria, conforme Figura 6.

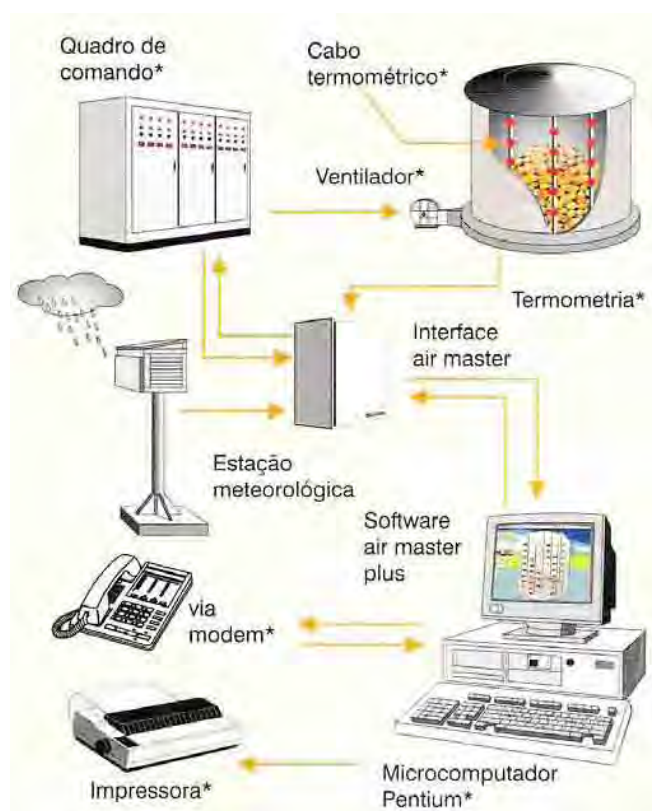


Figura 6 - Controle automático de aeração

O módulo controlador é microprocessado e a partir dele são realizadas, automaticamente, as leituras de todos os sensores da termometria, dos dados da estação meteorológica e do sensor de chuva.

Os sinais de saída são temporizados e interligados ao quadro de comando dos motores de aeração, havendo, em cada motor, uma chave que possibilita a seleção para os modos automático, controlado pelo computador, e manual, controlado pelo operador.

O *software* pode possibilitar o gerenciamento dos motores de aeração, de acordo com as seguintes variáveis:

- termometria;
- análise histórica do clima através da umidade e da temperatura ambiente (estação meteorológica);
- umidade do grão;
- tipo de grão;
- tabela de equilíbrio higroscópico de cada tipo de grão;
- programação solicitada pelo operador, através de estratégias pré-definidas;
- limitação de consumo (controle de demanda);
- priorização no acionamento dos motores;
- comunicação, on-line, entre a unidade do cliente e sua sede e/ou a central de atendimento, para o envio de relatórios, suporte técnico ou manutenção remota.

Segundo Weber (2001), o sistema computadorizado permite selecionar vários tipos de aeração, com operação totalmente automatizada, segundo um dos objetivos a seguir:

- **secagem:** caso de produtos armazenados com excesso de umidade. Para que a secagem ocorra, é necessário que a umidade relativa do ar corrigida seja, pelo menos, 5% mais baixa que o ponto de equilíbrio higroscópico do grão;
- **conservação:** caso em que os grãos se encontram secos e frios, em boas condições de armazenagem, dentro de padrão seguro, necessitando de aeração apenas para manutenção;
- **resfriamento sem secagem:** caso em que os grãos são introduzidos secos e quentes. Faz-se o resfriamento sem remoção de umidade;
- **resfriamento com secagem:** neste caso a aeração se presta, concomitantemente, à secagem e ao resfriamento do produto;
- **aeração anti-fungo:** este tipo de aeração tem por finalidade retirar a massa de grãos de condição sujeita à proliferação de fungos;

- **aeração por intervalo:** é realizada sempre que houver necessidade de aerar a massa de grãos, mas que não se enquadra em nenhuma já citada. Neste caso, há a intervenção do operador que altera os parâmetros/configurações limites;
- **resfriamento com comutação automática:** este tipo de aeração fará o resfriamento da massa de grãos e, quando a temperatura alcançar o valor desejado, o tipo de aeração será automaticamente comutado para aquela que se determinar (exemplo: comutada para conservação);
- **aeração anti-fungo com conservação:** este tipo de aeração é uma associação entre os tipos aeração anti-fungo e conservação. O motor do ventilador será acionado sempre que estiverem satisfeitas as condições dos dois tipos de aeração;
- **aeração anti-fungo com resfriamento, sem secagem:** é uma associação entre os tipos aeração anti-fungo e resfriamento sem secagem. O motor do ventilador será acionado sempre que estiverem satisfeitas as condições dos dois tipos de aeração;
- **aeração anti-fungo com resfriamento e secagem:** é a associação dos tipos aeração anti-fungo, resfriamento com secagem e secagem. O motor do ventilador será acionado sempre que estiverem satisfeitas as condições dos três tipos de aeração;
- **bloqueio:** é a configuração utilizada quando as condições dos grãos armazenados são ótimas e se prevê que, por determinado período, não deverá ocorrer aeração, ou ainda, quando o silo estiver vazio.

3.5 Sistema de Aeração

O sistema de aeração consiste de um conjunto de equipamentos mecânicos e elétricos, necessários à perfeita realização da aeração e é basicamente composto por:

- silos que armazenam a massa de grãos;
- dutos para conduzir e distribuir o ar através da massa de grãos;
- tubos de conexão que ligam os ventiladores aos condutores;

- ventiladores com motores que devem fornecer a quantidade de ar necessária ao resfriamento do produto, sendo capazes de vencer a resistência oferecida à passagem deste ar pela massa de grãos armazenada;
- dispositivos para monitoramento, que indicam as condições do ambiente interno e externo da massa de grãos e podem acionar o sistema de ventilação em função dessas condições.

3.5.1 Silos

Os silos são células individualizadas, construídas de chapas metálicas, concreto ou alvenaria, dotadas de controles termométricos, aeração e expurgo - condições básicas para a preservação da qualidade dos grãos por períodos prolongados.

São vários os tipos de silos existentes, variando entre verticais, horizontais, com condução por coluna, com fundos falsos perfurados, com sistemas de aeração direta por insuflação ou sucção, com sistemas de dutos centrais e bifurcações, entre outros.

Cada silo se destina a uma finalidade e assim, suas características são diferentes; as Figuras 7 e 8 apresentam silos utilizados para conservação e secagem de grãos, respectivamente. Ao se projetar um silo, os itens principais que influenciarão na sua eficiência são o tipo de grão a ser armazenado; as dimensões relativas à altura e seção da célula e que irão determinar sua capacidade de armazenamento; a vazão específica recomendada; a perda de carga a ser vencida e o ventilador a ser utilizado.



Fonte: Kepler Weber Indústria S.A.

Figura 7 - Silo metálico, plano, vertical - conservação de grãos



Fonte: Kepler Weber Indústria S.A.

Figura 8 - Silo metálico, plano, vertical - secador de grãos

3.5.2 Dutos

Dutos para distribuição de ar podem ser divididos em principais (ou de suprimento) e secundários (ou de aeração). Os primeiros, sem perfuração, têm por finalidade conectar o ventilador a um ou mais dutos secundários; os segundos, com perfuração, têm a função de distribuir o ar através da massa de grãos, o mais uniformemente possível.

A velocidade admissível para o ar dentro do duto é de 470 a 600m/min para comprimento de duto de até 7,5 metros; e 300 a 470 m/min para comprimento de duto entre 7,5 e 18 metros.

Ao deixar os furos dos dutos para entrada na massa de grãos, a velocidade máxima do ar é de 10 m/min, para silos horizontais e de 15 m/min, para silos verticais.

3.5.3 Ventiladores

Os ventiladores são equipamentos que, por meio da rotação de um rotor centrífugo ou axial, acionado por um motor, permitem transformar a energia mecânica do rotor em energia potencial de pressão e energia cinética. São selecionados de modo a

fornecer uma vazão determinada de ar a uma pressão pré-calculada, vencendo a resistência dos grãos e a perda de pressão nas tubulações.

Os ventiladores axiais (Figura 9) são montados internamente a uma carcaça em forma de tubo, cujo rotor axial, em forma de hélice, encontra-se montado diretamente no eixo do motor, de forma que o fluxo de ar se desloca paralelamente a esse eixo. São indicados para situações de altas vazões e baixas pressões (máximo 100mmca).



Fonte: Otam Ventiladores Industriais Ltda.

Figura 9 - Ventilador axial

Os ventiladores centrífugos (Figura 10) possuem uma carcaça externa e o ar entra na caixa paralelamente ao eixo do motor, sendo descarregado perpendicularmente à direção de entrada. O rotor pode ser fabricado com as pás curvadas para trás, curvadas para frente, radiais ou com pás retas.



Fonte: Otam Ventiladores Industriais Ltda.

Figura 10 - Ventilador centrífugo

Para aeração de produtos agrícolas, os mais indicados são os ventiladores que apresentam pás curvadas para trás, nível de pressão máxima 800 mmca.

3.5.4 Seleção de Ventiladores

Os ventiladores são especificados e selecionados a partir de dois elementos principais: vazão total de ar, expressa em m^3/h e pressão total (Δp), normalmente expressa em mmca.

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.

A resistência ao escoamento do ar quando este está atravessando uma camada de grãos, depende da característica da superfície do produto (rugosidade), forma e tamanho das impurezas presentes na massa de grãos, configuração e tamanho dos espaços intersticiais na massa, tamanho e quantidade de grãos quebrados e altura da camada de grãos.

É necessário que o ar possua uma certa pressão para conseguir 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.

Os dados da queda de pressão ocasionada pelo produto são empíricos e normalmente apresentados na forma de gráficos e equações.

Segundo Lasseran (1981), a perda de carga ocasionada pelo escoamento do ar no meio do grão (P_e) 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 (P_e) 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 (Δp), 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 equação (1):

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

onde:

Δp : pressão total fornecida pelo ventilador (mmca).

H : altura da massa de grãos (m);

P_e : perda de carga no meio do grão (mmca);

v_a : velocidade do ar (cm/s);

k_1 : coeficiente dependendo da natureza do grão $\left(\frac{kg}{m^3} (cm/s)^{-1} \right)$

k_2 : coeficiente dependendo da natureza do grão $\left(\frac{kg}{m^3} (cm/s)^{-2} \right)$

Segundo Silva (2000), a pressão total será obtida somando-se a perda de carga no meio do grão, à perda de carga devido às tubulações, válvulas, registros, curvas, etc., que é estimada em 20% da perda de carga no meio dos grãos. Considera-se, ainda, um fator de compactação da massa de grãos igual a 60% em relação à perda de carga no meio do grão, conforme equação (2).

$$\Delta p = P_e + (P_e \cdot 0,2) + (P_e \cdot 0,6) \quad (2)$$

onde:

Δp : pressão total fornecida pelo ventilador (mmca).

P_e : perda de carga no meio do grão (mmca)

Ainda segundo Silva (2000), em 1953, Shedd, citado por Hendersem e Perry (1976), obteve a queda de pressão para diversos produtos agrícolas com diferentes teores de umidade. Esses dados foram apresentados através de um gráfico, as “curvas de Shedd”, que em coordenadas logarítmicas, relacionam a queda de pressão por unidade de altura da camada do produto, com a vazão de ar, conforme Figura 11.

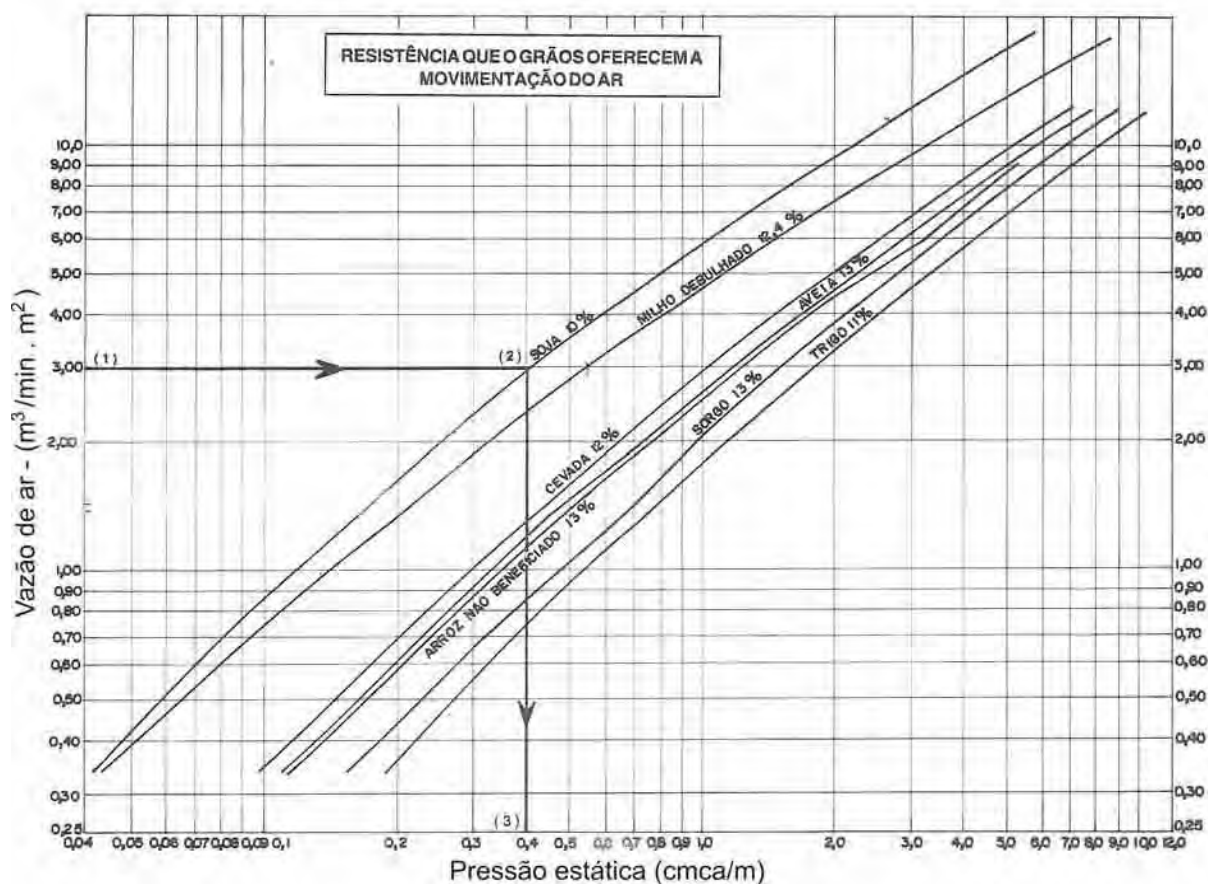


Figura 11 - Resistência oferecida pelos grãos à passagem do ar

Estes mesmos autores afirmam que as curvas de Shedd só devem ser utilizadas para silos com até seis metros de altura de camada de grãos. Para fluxos de ar de 0,6 a 12 m³/min m², o gráfico pode ser substituído pela equação (3):

$$Pe = \frac{(a \cdot Q^2 \cdot Hg)}{\ln(1 + bQ)} \quad (3)$$

onde:

Pe: pressão equivalente à altura total da camada de grãos (mmca)

Q: fluxo de ar (m³/min · m²)

Hg: altura da massa de grãos (m)

a,b: constantes que dependem do produto conforme Tabela 6:

Tabela 6 – Constantes a e b para diversos produtos, equação (3).

Produto	a	b
Arroz em casca	0,722	0,197
Aveia	0,718	0,243
Milho	0,583	0,512
Soja	0,333	0,302
Trigo	0,825	0,164

Fonte: Silva (2000)

Segundo Weber (2001), outra maneira para obtenção da perda de pressão à passagem de ar através da massa de grãos e selecionar o ventilador, pode ser a partir dos gráficos das Figuras 12, 13 e 14 onde, conhecida a altura (m) da camada de grãos e a vazão ($m^3/h/t$), pode-se conhecer a potência do motor, em HP, para cada 26 ou 27 toneladas de grãos (soja, milho e trigo) armazenados, e a pressão estática, em polegadas de água.

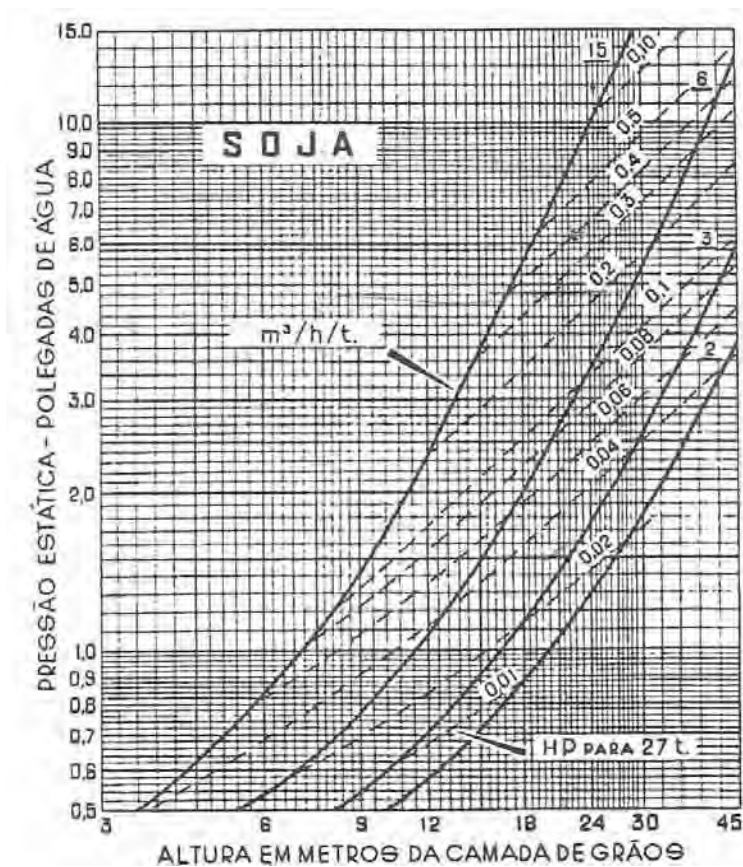


Figura 12 - Pressão e potência do motor para aerar grãos de soja

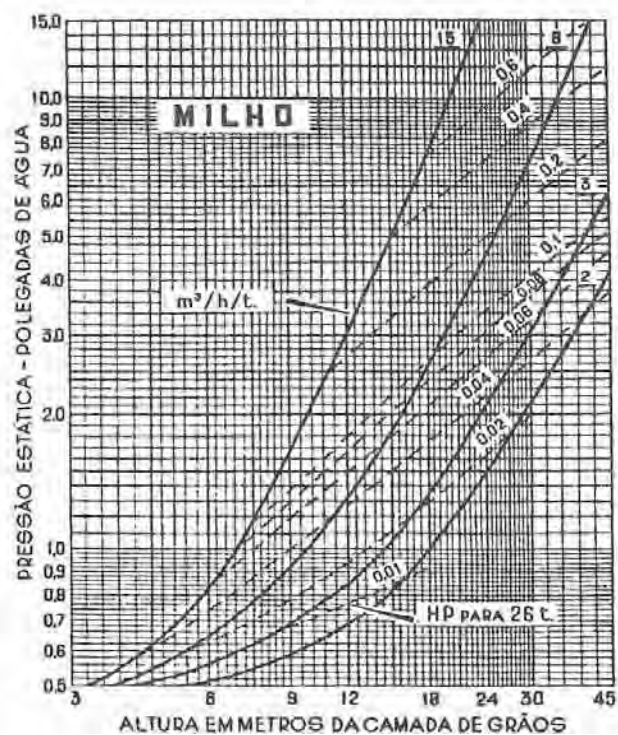


Figura 13 – Pressão e potência do motor para aerar grãos de milho

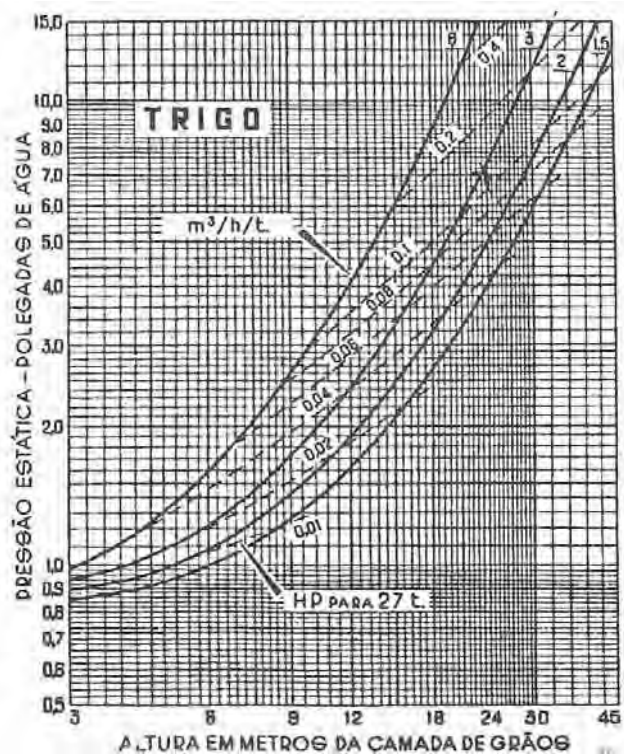


Figura 14 – Pressão potência do motor para aerar grãos de trigo

A potência do motor do ventilador poderá ser calculada diretamente pela equação (4):

$$P = \frac{\Delta p \times Q}{75 \times \eta} \quad (4)$$

onde,

P: potência do motor (cv)

Δp : pressão total (mmca)

Q: vazão (m³/s)

η : rendimento (%)

3.5.5 Curvas Características dos Ventiladores

Estudar a interdependência entre as grandezas características dos ventiladores baseando-se em considerações puramente teóricas é muito difícil. Em vista disso, recorre-se a ensaios de laboratório, que permitem expressar a variação de uma grandeza em função da outra, em forma de gráficos, possibilitando fácil e rápida escolha do ventilador e uma análise de seu comportamento em função das variações nas grandezas representadas.

Os testes para ventiladores são padronizados pela *Air Moving And Conditioning Association* (AMCA). O duto conectado ao ventilador, Figura 15, tem comprimento dez vezes maior que seu diâmetro. A válvula cônica serve para regular a resistência ao escoamento do ar, permitindo a variação da vazão. A vazão e a pressão são medidas com o auxílio do tubo de Pitot e manômetro.

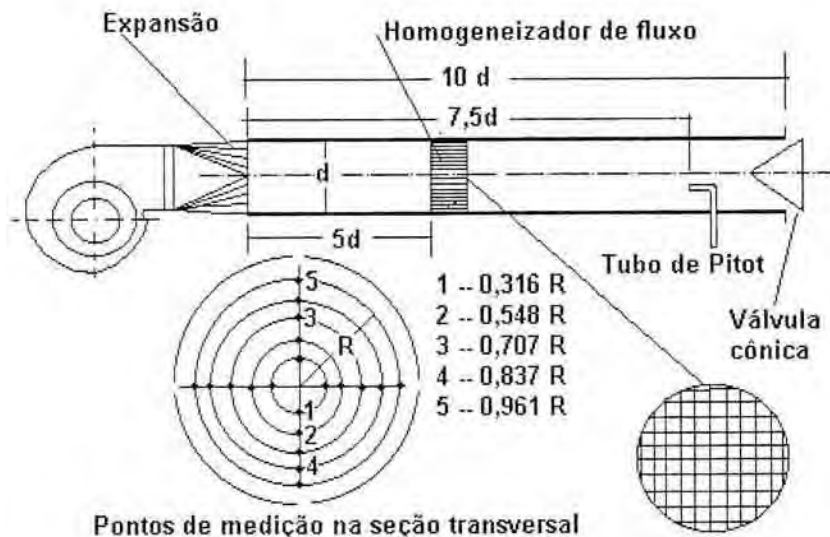


Figura 15 - Normalização para obtenção de curvas características de ventiladores

As curvas características mais importantes para ventiladores são:

- Para um valor ω (rpm) constante: variação das grandezas pressão total Δp (mmca), potência P (cv) e rendimento (η) em função da vazão Q (m³/h).
- Variação das grandezas Δp , Q , P , η em função do número de rotações ω .

Determinadas todas as quedas de pressão nos diversos componentes do sistema, em função da vazão de ar, é possível expressar esse dados em forma de gráfico, pressão versus vazão, que é denominado curva característica do sistema.

Utilizando-se de um *software* para dimensionamento de ventiladores, MAEV2000 - versão 2, *software*, esse, utilizado por grandes empresas projetistas de silos de armazenagem de grãos no Brasil - desenvolvido pela Otam Ventiladores Industriais Ltda, é possível, além de dimensionar um ventilador para a aplicação desejada, conhecer as características de desempenho do ponto de operação desse ventilador, variando a vazão e ou a pressão estática. As Figuras 16 e 17 apresentam as características de desempenho de um ventilador RLS- 710, dimensionado a partir desse *software*.



Figura 16 – Características de desempenho de um ventilador RLS -710

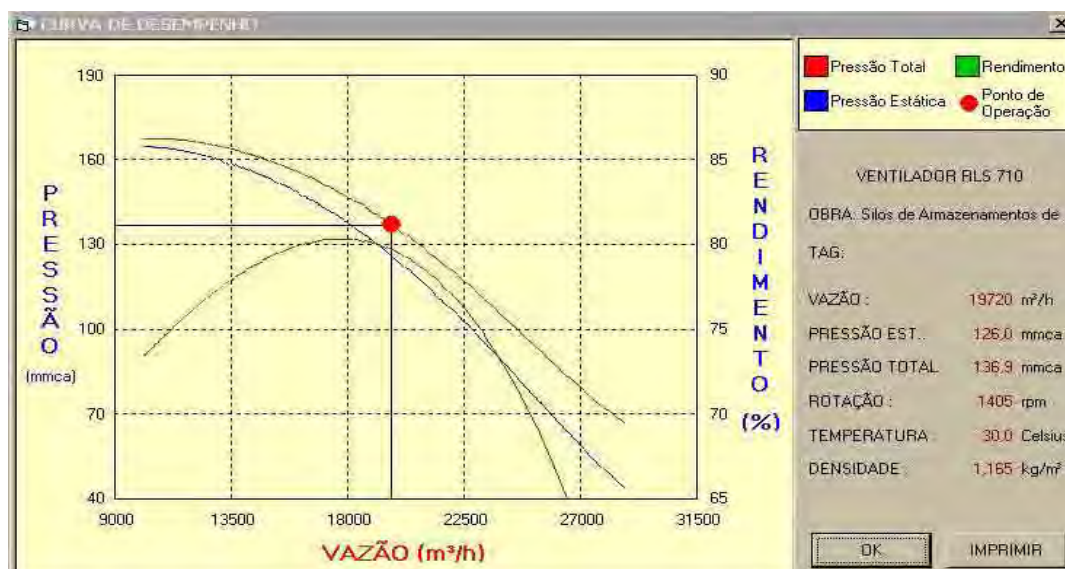


Figura 17 - Curvas características de desempenho de um ventilador RLS -710

3.6 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. Essa 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 e assim, 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 gera 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. A Figura 18 apresenta o esquema de um silo vertical com a progressão da zona de resfriamento.

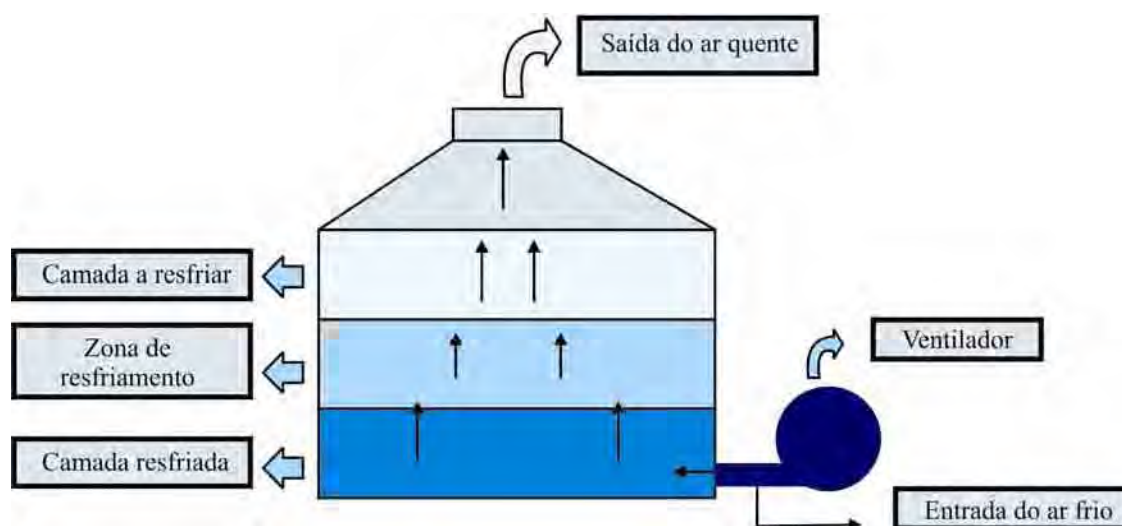


Figura 18 - Propagação da zona de resfriamento

No início do processo observa-se que há aquecimento nas últimas camadas e isso se deve ao fato do grão desprender calor, por um lado, e à rápida elevação da temperatura, por outro. 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, entre outras. Resultados mostram que a velocidade de progressão da zona de resfriamento deve ser tal que a última camada de grãos seja atingida pelo resfriamento antes de ser aquecida.

O tempo necessário para resfriar completamente uma massa de grãos, que 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, ou seja, o tempo de resfriamento da massa de grãos para 1 ciclo, é dado pela equação (5); sendo que 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 (6) e (7).

$$t_H = \frac{H}{v_g} \quad (5)$$

$$v_a = \frac{Q}{S} \quad (6)$$

$$v_g = v_a \frac{r_a c_a}{r_g c_g} \quad (7)$$

onde:

t_H : tempo de resfriamento da massa de grãos para 1 ciclo

H : altura da massa de grãos (m)

v_a : velocidade do ar (m/h);

v_g : velocidade da zona de resfriamento (m/h);

Q : vazão total (m³/h);

S : seção da célula (m²);

r_a : massa específica do ar (kg/m³);

r_g : massa específica do grão (kg/m³);

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}), conforme equação (8). Puzzi (1986) também recomenda esta fórmula de cálculo, porém afirma que é um tempo provável de aeração.

$$t_{\text{aer}} = 3 t_{\text{H}} = 3 \cdot \frac{H}{v_{\text{g}}} \quad (8)$$

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).

Segundo Silva (2000), o tempo provável para o resfriamento de uma massa de grãos em um silo pode ser determinado pela equação (9):

$$t_{\text{aer}} = \frac{16,6 \cdot mg \cdot cg}{Q_t \cdot r_a \cdot c_a} \quad (9)$$

onde:

t_{aer} : tempo de aeração (h)

mg: massa total de grãos (t)

cg : calor específico do grão (kJ/kg°C).

Q_t : vazão total (m³/min);

r_a : massa específica do ar (kg/m³);

c_a : calor específico do ar (kJ/kg °C);

3.7 Consumo de Energia Elétrica para Aeração

O consumo de energia elétrica nos dias atuais tem se tornando uma das grandes preocupações de Governo e de todos os setores de produção. Os gastos com energia elétrica estão na pauta de discussão de todo o sistema produtivo, principalmente pelo fato de preços de tarifas cobradas por concessionárias de energia representarem parte significativa do custo final do produto. 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.

Segundo Lasseran (1981), considerando o peso específico médio de $0,8 \text{ t/m}^3$ obtido após compactação da massa de grãos dentro da célula, a potência elétrica absorvida da rede é dada pela equação (10):

$$P_e = \frac{P_v}{0,8} \quad (10)$$

onde:

P_e : potência absorvida da rede (kW);

P_v : potência absorvida pelo ventilador (kW).

A energia elétrica consumida é calculada através da equação (11):

$$W_e = P_e \cdot t_{aer} \quad (11)$$

onde:

W_e : energia elétrica consumida (kWh);

P_e : potência absorvida na rede (kW);

t_{aer} : tempo de aeração (h).

3.7.1 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 e, historicamente, têm sido acionados por motores de indução, operando com velocidade praticamente constante.

As leis de proporcionalidade dos ventiladores centrífugos, ainda que teóricas, podem ser aplicadas com precisão suficiente às condições reais quando a densidade do ar é considerada constante. Segundo Doll (1989), essas leis mostram que a vazão é diretamente proporcional à velocidade no eixo do ventilador, que a pressão varia com o quadrado da velocidade e que a potência desenvolvida varia com o cubo da velocidade, conforme equações (12), (13) e (14):

$$Q_2 = Q_1 \frac{\omega_2}{\omega_1} \quad (12)$$

$$\Delta p_2 = \Delta p_1 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^2 \quad (13)$$

$$P_2 = P_1 \left(\frac{\omega_2}{\omega_1} \right)^3 \quad (14)$$

Nessas equações, tem-se:

Q: vazão total (m³/h);

Δp : pressão total (mmca);

P: potência desenvolvida (kW);

ω : ponto de operação de velocidade do eixo do ventilador (rpm);

A Figura 19 mostra o comportamento das grandezas características de um ventilador centrífugo em função da velocidade do motor.

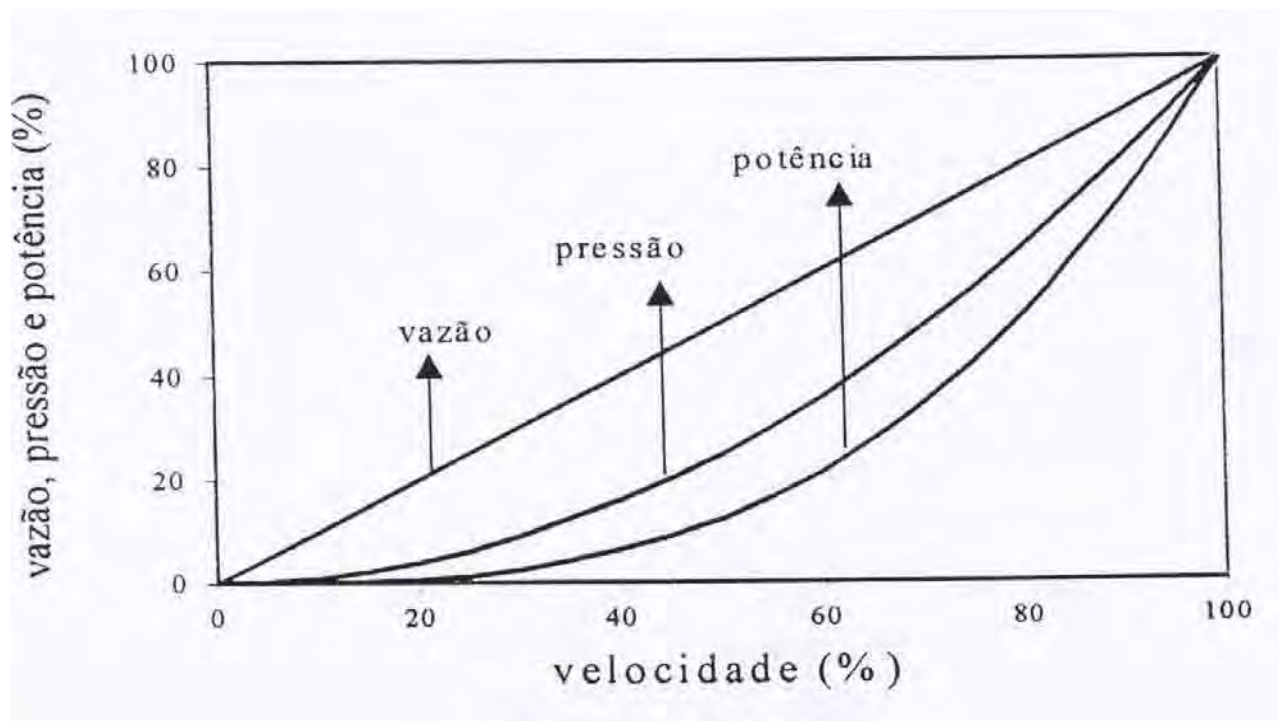
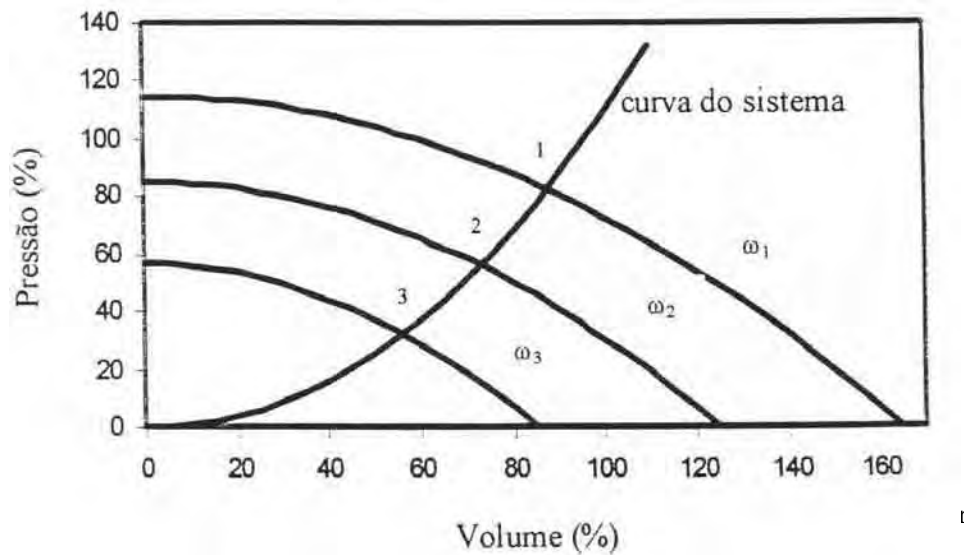


Figura 19 - Características de um ventilador centrífugo em função da velocidade do motor

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

Na Figura 20 observa-se 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 se obtém uma família de curvas para o ventilador. Com a diminuição da velocidade, o ponto de operação do sistema se altera. Para uma velocidade ω_2 (ponto 2) menor que ω_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 (12) a (14), fica caracterizado o potencial de economia de energia.



3.7.2 Motor de Indução

Os motores mais utilizados para acionar máquinas ou equipamentos que requerem algum tipo de movimento controlado são os motores de indução. Neles, a velocidade de operação do rotor é praticamente constante, um pouco abaixo da velocidade síncrona. A diferença entre a velocidade síncrona e a velocidade do rotor é conhecida como escorregamento. A velocidade do motor de indução pode ser calculada a partir da equação (15):

$$\omega = \frac{120 \cdot f(1 - S)}{p} \quad (15)$$

onde:

ω : velocidade do motor (rpm);

f : frequência (Hz);

p : número de pólos;

S : escorregamento.

A eficiência dos motores de indução é de aproximadamente 85%, mas quando alimentados com tensão e frequência constantes e sempre que não necessitam operar à plena carga, estarão desperdiçando energia.

Os sistemas mais utilizados para variação de velocidade foram, por muito tempo, implementados com motores de indução de velocidade fixa em conjunto com um segundo dispositivo de conversão que utilizava componentes mecânicos, hidráulicos ou elétricos e que apresentavam, além de baixa eficiência, altos custos.

A partir da década de 80, com o desenvolvimento de semicondutores de potência, foi possível a implementação de sistemas eletrônicos de variação contínua de velocidade, os chamados inversores de frequência. Estes sistemas convenientemente utilizados podem proporcionar economia de energia, melhoria no desempenho de máquinas e equipamentos, eliminação das elevadas correntes de partida dos motores e aumento na vida útil dos equipamentos.

Os motores de indução mais utilizados pela indústria são os chamados motores de gaiola, trifásicos.

No motor de indução, com a circulação da corrente elétrica, dois campos magnéticos são criados, sendo um no estator e outro no rotor. A diferença de velocidade do campo magnético girante do estator em relação ao rotor produz uma tensão e uma corrente induzida no motor e a interação entre os dois campos magnéticos produz uma força que faz com que o rotor gire, disponibilizando assim energia mecânica (torque) no seu eixo.

As curvas características, torque e corrente x velocidade do motor de indução, Figura 21, mostram que a partir do valor de torque equivalente a 150% do nominal, as duas curvas apresentam o mesmo comportamento, isto é, o torque e a velocidade têm um comportamento linear com a corrente. Os inversores de frequência trabalham exclusivamente nesta região.

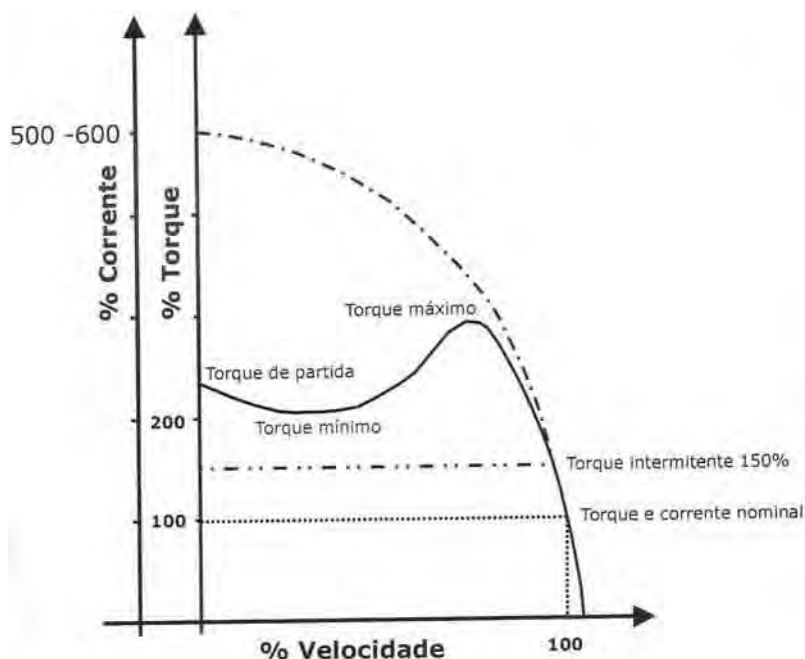


Figura 21 – Curvas características – torque e corrente x velocidade

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, pelo 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 desenvolvidos pelo motor e 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.

A Figura 22 mostra o comportamento da curva torque x velocidade, quando o motor é alimentado através de um inversor de frequência. O motor do exemplo é de 4 polos, 60 Hz, velocidade síncrona 1800 rpm e velocidade no eixo 1750 rpm.

A 30Hz observa-se que a velocidade síncrona se reduz pela metade, 900 rpm, enquanto a velocidade no eixo é de 850 rpm; a diferença entre velocidade síncrona e velocidade no eixo (escorregamento) é constante.

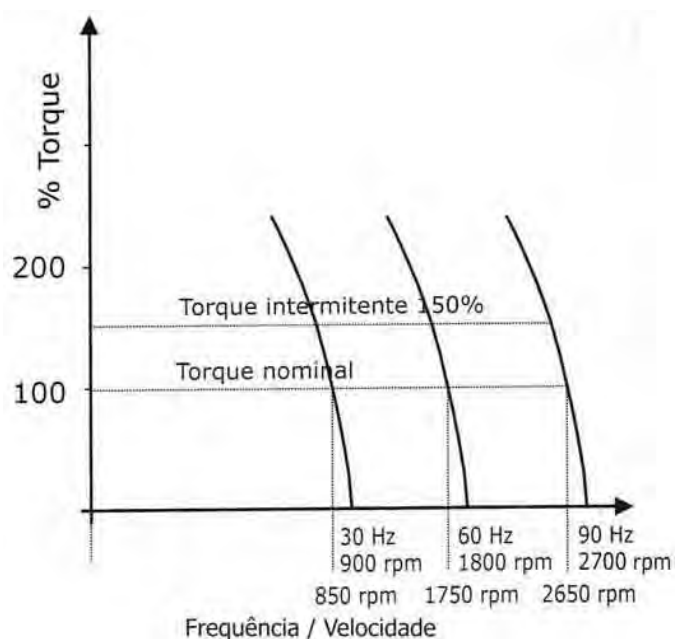


Figura 22 - Torque x velocidade

Outra característica importante de acionamento de motores com inversores de frequência é que a corrente de partida é praticamente da ordem da corrente nominal, e que alimentando o motor a partir de 3 ou 4 Hz pode-se obter, no rotor, um torque de 150% do nominal, suficiente para acionar qualquer carga acoplada ao motor.

3.7.3 Funcionamento do Inversor de Frequência

Os inversores de frequência utilizam a tecnologia dos semicondutores de potência para, a partir da tensão e frequência constantes da rede, fornecer uma fonte de tensão com frequência variável. São compostos por duas partes: uma de retificação, que

converte uma tensão alternada com frequência fixa em tensão contínua, e outra de inversão, que converte uma tensão contínua em tensão alternada, com frequência variável

A Figura 23 apresenta o diagrama esquemático de um inversor de frequência.

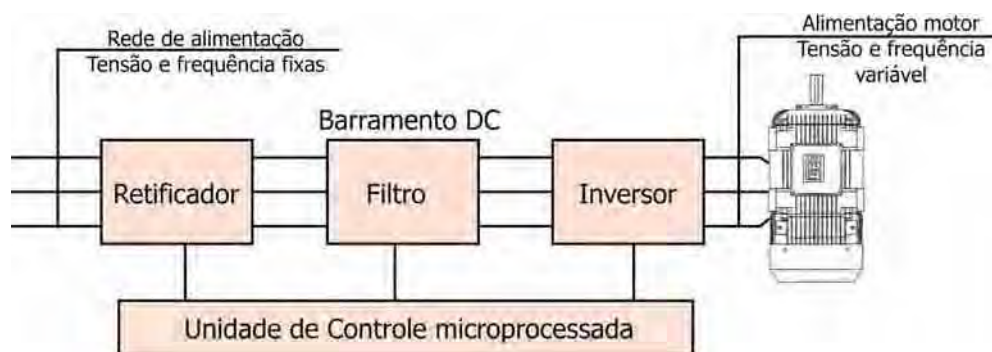


Figura 23 - Diagrama esquemático de um inversor de frequência.

O inversor é composto de seis chaves implementadas numa configuração, como mostra a Figura 24.

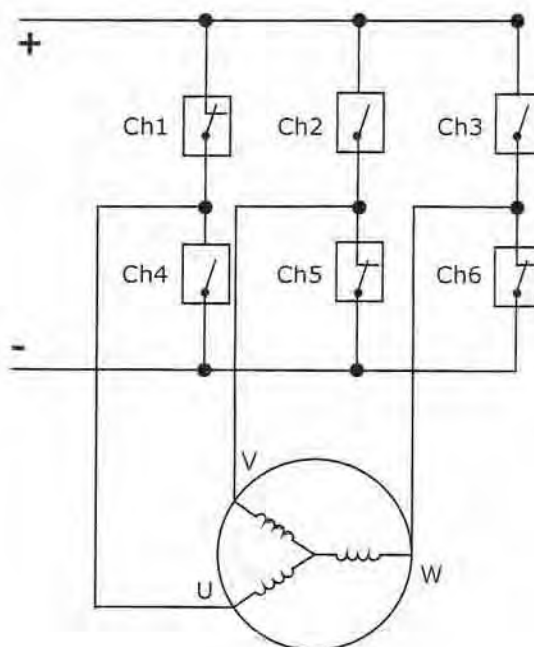


Figura 24 - Configuração interna de um inversor de frequência

Dependendo da combinação de chaves, abertas ou fechadas, pode-se obter, na saída do inversor, formas de ondas diferentes. Essas chaves são implementadas nos inversores de frequência com dispositivos semicondutores chamados de transistores de potência. Os transistores mais freqüentemente utilizados são os chamados IGBT, transistor bipolar com porta isolada (Insulated Gate Bipolar Transistor).

A Figura 25 mostra um exemplo simples de como pode ser gerada uma primeira aproximação de onda senoidal. A linha cheia representa a onda gerada pela combinação de seis estados das chaves, a linha senoidal serve de referência para identificação da aproximação mencionada.

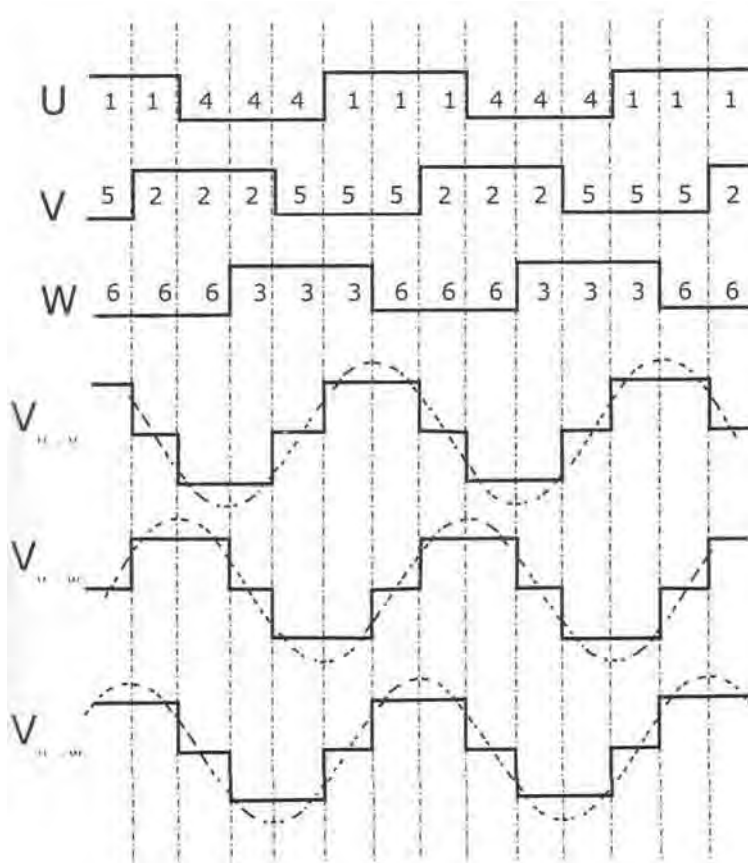


Figura 25 - Geração de onda senoidal

Durante o primeiro estado, as chaves 1,5 e 6 estão fechadas e as chaves 2, 3 e 4, abertas. Assim, no motor, a tensão entre U e V é positiva, entre as fases V e W é zero

e entre as fases U e W é positiva. Nos cinco estados seguintes, muda-se a combinação de chaves abertas e fechadas, permanecendo o mesmo tipo de análise do primeiro estado.

Pode-se deduzir, ainda, a partir da Figura 25, que variando o tempo que cada combinação de chave permanece num determinado estado, podendo variar a frequência da onda de saída.

Os inversores de frequência modernos utilizam para a combinação de abertura e fechamento das chaves uma estratégia chamada “PWM” (Pulse Width Modulation). Essa estratégia permite a geração de ondas senoidais de frequência variável com resolução de até 0,01 Hz.

3.7.4 Controle Escalar dos Inversores de Frequência

O funcionamento de inversores de frequência com controle escalar está baseado numa estratégia de comando chamada “V/F constante” que mantém o torque do motor constante, igual ao nominal, para qualquer velocidade de funcionamento. É utilizado em aplicações normais que não requeiram dinâmica (grandes acelerações e frenagens), nem elevada precisão e nem controle de torque. Um inversor com controle escalar pode controlar a velocidade de rotação do motor com uma precisão de até 0,5% da rotação nominal para sistemas sem variação de carga e de 3 a 5% com variação de carga, de 0 a 100% do torque nominal.

Os motores de indução utilizados em sistemas de aeração de grãos normalmente são convencionais, sem nenhum sistema de realimentação de velocidade em malha fechada. Com estas características, o inversor de frequência com controle escalar é a opção mais apropriada pois apresenta relativamente menor custo se comparado com outros tipos de inversores mais sofisticados, que apresentam alta precisão de regulação de velocidade e torque.

3.7.5 Instalação de Inversores de Frequência

Os inversores de frequência são projetados para operar em redes de alimentação simétricas. A tensão entre fase e terra deve ser constante e se, por algum motivo, esta tensão variar, será necessário colocar um transformador de isolamento e/ou reatâncias de rede.

As reatâncias de rede são utilizadas também para:

- minimizar falhas no inversor, provocadas por sobretensões transitórias na rede de alimentação;
- reduzir harmônicas;
- melhorar fator de potência.

Filtros de rádio + frequência: são utilizados na entrada dos inversores para filtrar sinais de interferências (ruído elétrico) gerados pelo próprio inversor, que são transmitidos pela rede e podem causar problemas em outros equipamentos elétricos.

Na grande maioria dos inversores esse dispositivo já vem incorporado internamente.

Cabos: o cabo de conexão do inversor com o motor é uma das fontes mais importantes de emissão de radiação eletromagnética, radiação essa, que pode afetar o desempenho de equipamentos eletro-eletrônicos. Sendo assim, é necessário seguir os seguintes procedimentos de instalação:

- cabo com blindagem e fio terra. Como alternativa pode ser usado eletroduto metálico com fiação comum interna;
- blindagem ou eletroduto metálico aterrados;
- separar os cabos de sinal, controle e cabos de alimentação de equipamentos sensíveis;
- manter sempre continuidade elétrica de blindagem, mesmo que contadores ou relés térmicos sejam instalados entre o inversor e o motor;
- separar cabos de potência dos cabos de sinais de controle;
- aterramento em um único ponto para o filtro, o inversor e o motor

Quando a distância entre o motor e o inversor for grande (valor depende do motor utilizado), pode ocorrer:

- sobretensão no motor produzida por um fenômeno chamado onda refletida;
- geração de capacitâncias entre cabos de potências que retornam para o inversor, produzindo o efeito de fuga à terra.

Esses problemas podem ser solucionados utilizando-se uma reatância entre o motor e o inversor.

3.7.6 Aplicação de Acionamentos com Motores de Indução e Inversores de Frequência

O controle da vazão ou de pressão em bombas centrífugas e ventiladores, através da variação de velocidade, possibilita grande economia de energia. Isso é possível pois esta família de máquinas têm como características o torque de carga, que apresenta crescimento quadrático com a rotação, enquanto a potência elétrica é proporcional à variação de velocidade elevada ao cubo.

É importante frisar que em sistemas de controle de vazão ou pressão, utilizando inversor de frequência, a potência absorvida da rede será apenas a necessária na condição de operação do sistema.

O controle de processos com inversores de frequência é possível, e para isso é necessário utilizar um regulador PID para controlar diversas variáveis do sistema, superpondo seu sinal de controle ao controle normal de velocidade do inversor.

3.7.7 Curva de Carga e Demanda

Segundo Cotrim (2003), a potência elétrica consumida por uma instalação predial qualquer – potência ativa – é extremamente variável em função do número de cargas ligadas e da potência consumida por cada uma delas, a cada instante, de modo que para a análise de uma instalação é conveniente trabalhar com a demanda, que é o valor médio da potência ativa, em um intervalo de tempo Δt especificado, conforme equação (16):

$$D = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t + \Delta t} P \cdot dt \quad (16)$$

onde,

D: demanda;

P: valor médio da potência ativa;

Δt : intervalo de tempo (geralmente 15 minutos).

A definição dada pela equação (16) indica que a demanda é medida em unidades de potência ativa (W, kW). Pode-se também definir uma demanda reativa, D_Q (Var, KVAR) e uma demanda aparente, D_s (VA, kVA), através das equações (17) e (18):

$$D_Q = D \cdot \operatorname{tg}\phi \quad (17)$$

$$D_s = \frac{D}{\cos\phi} \quad (18)$$

Sendo ϕ o ângulo cujo co-seno é o fator de potência da instalação.

A Figura 26 apresenta a definição de demanda, a área entre a curva $P = P(t)$ e o eixo dos tempos é a energia consumida pela instalação no intervalo de tempo considerado. Essa área hachurada, portanto, é a energia consumida durante Δt , conforme equação (19):

$$\varepsilon = D \cdot \Delta t \quad (19)$$

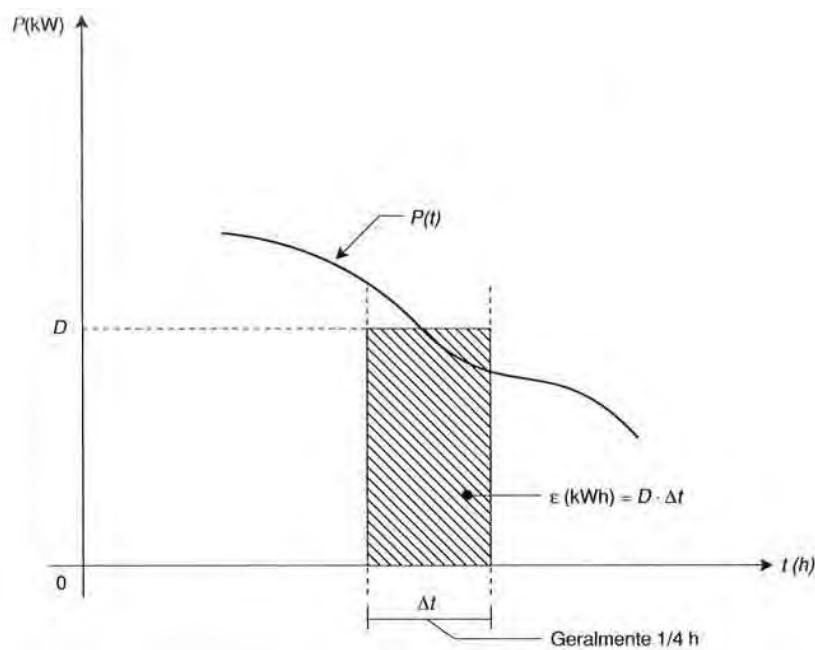


Figura 26 - Definição de demanda

Chama-se curva de carga, a curva que dá a demanda em função do tempo, $D = D(t)$, para um dado período T . Ela é constituída por patamares (conforme Figura 27) sendo, entretanto, mais comum apresentá-la como uma curva, resultado da união dos pontos médios das bases superiores dos retângulos de largura Δt . Para um período T , a ordenada máxima da curva define a demanda máxima, D_M . A energia total consumida no período, ϵ_t , será medida pela área entre a curva e o eixo dos tempos, conforme equação (20):

$$\epsilon_t = \int_0^T D \cdot dt \quad (20)$$

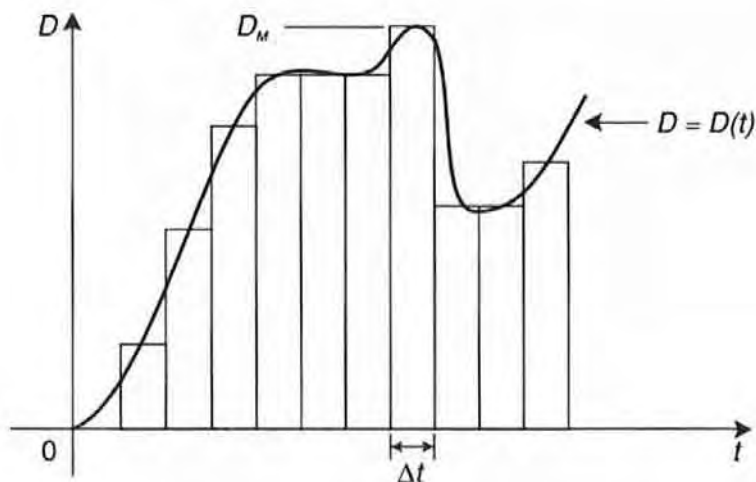


Figura 27 - Curva de carga

A demanda média, D_m , será definida como a altura de um retângulo cuja base é o período T e cuja área é a energia total, ϵ_t , conforme equação (21):

$$D_m = \frac{\epsilon_t}{T} \quad (21)$$

A demanda média é, assim, a demanda constante que a instalação deveria apresentar para, no período considerado, consumir uma energia igual à consumida com funcionamento normal.

Para análise de instalações prediais, a curva de carga diária, ou seja, para $T = 24$ horas, é a mais comum, sendo que cada tipo de instalação possui uma forma característica para sua curva de carga diária (média). Assim a curva diária típica de um edifício de escritórios é diferente de um edifício de apartamentos e ambas são diferentes de uma indústria química. Por outro lado, em instalações situadas em regiões onde as estações do ano são bem definidas, as curvas de carga típicas são diferentes conforme a época do ano.

É importante observar que os conceitos de demanda e curva de carga apresentados são válidos não apenas para uma instalação, considerada como um todo, como também para os diversos setores considerados em uma instalação, ou mesmo para um conjunto de equipamentos de utilização.

É comum indicar, junto com a curva de carga, a potência instalada da instalação ou do setor considerado.

3.8 Tarifação de Energia Elétrica

Para a adoção de estratégias de otimização do uso de energia elétrica faz-se necessário o perfeito conhecimento da sistemática de tarifação e demais condições gerais de fornecimento estabelecidas pela Resolução ANEEL nº 456, de 29/11/2000 e suas retificações. Os consumidores são classificados em dois grandes grupos, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Grupos de Consumidores

Grupo A - Alta Tensão	Grupo B - Baixa Tensão
A-1 230 kV ou mais	B-1 - residencial
A-2 88 a 138 kV	B-1 - residencial baixa renda
A-3 69 kV	B-2 - rural
A-3a 30 a 44 kV	B-3 - não residencial nem rural
A-4 2,3 a 13,8 kV	B-4 - iluminação pública.
A- S 2,3 a 13,8 kV (subterrâneo)	

Fonte: Agência Nacional de Energia Elétrica

Para os consumidores do Grupo A, o faturamento é baseado na aplicação de uma tarifação binômica, composta por duas grandezas: consumo (kWh) e

demanda (kW), enquanto que para os consumidores do Grupo B, o faturamento é baseado somente no consumo (kWh).

Consumo (kWh) é o total de energia consumida dentro do ciclo de leitura, discriminado na fatura de energia elétrica.

Demanda contratada (kW) é a potência contratada entre concessionária e o consumidor, formalizada através de contrato de fornecimento de energia.

Demanda registrada é o máximo valor de demanda, integralizado de 15 minutos, durante o período de faturamento (ciclo de leitura) discriminado na fatura de energia elétrica.

Além dos parâmetros de consumo (kWh) e demanda (kW) a legislação brasileira permite, às concessionárias, tarifar a ultrapassagem de demanda contratada e o fator de potência quando este estiver abaixo do limite permitido de 0,92.

Em estudos realizados nos anos oitenta pela Eletrobrás, foi constatado que o perfil de comportamento do consumo de energia elétrica, ao longo do dia, está vinculado aos hábitos do consumidor e às características próprias do mercado de cada região. Foi também constatado que o sistema elétrico brasileiro, em quase sua totalidade, possui geração por meio de hidroelétricas com maior potencial de geração no período chuvoso.

Baseando-se nestas características, em 1982 a Eletrobrás instituiu a Estrutura Tarifária Horo-sazonal (azul e verde), onde as tarifas apresentam valores diferenciados segundo horários do dia e períodos do ano.

Para a modalidade horo-sazonal azul ou verde, tem-se:

- Horário de Ponta (P) - composto por 3 horas consecutivas, definidas pela Concessionária de acordo com as características de seu sistema elétrico, situado no intervalo compreendido diariamente entre 17:00h e 22:00h, exceto sábados, domingos e feriados federais. Na maioria das concessionárias o horário de ponta estabelecido é das 17:30h às 20:30h.
- Horário Fora de Ponta (FP) - composto pelas 21 horas diárias complementares ao horário de ponta, sábados, domingos e feriados federais. É subdividido em:
 - Fora de Ponta Indutiva - intervalo compreendido das 6:30h às 17:30h e 20:30h às 0:30h;

- Fora de Ponta Capacitiva - intervalo compreendido das 0:30h às 6:30h;
- Período Úmido - período de 5 meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de dezembro a abril do ano posterior;
- Período Seco - período de 7 meses consecutivos, compreendendo os fornecimentos abrangidos pelas leituras de maio a novembro do mesmo ano.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa foi realizada na empresa Indústria de Produtos Dallas Ltda, Setor de Armazenamento de Grãos, na cidade de Nova Alvorada do Sul (MS), no período de 25/03/04 a 22/10/04.

4.1 Caracterização do Sistema de Armazenagem de Grãos

Silos: a empresa possui nove silos metálicos, planos, verticais, de fabricação Kepler Weber, modelo 6022 - conforme Figura 28 - onde são armazenados soja, milho, arroz, trigo, e têm as seguintes dimensões:

- diâmetro nominal: 18.189,5 mm

- altura total: 25.591,7 mm
- altura do cilindro: 20.223,7 mm
- volume útil: 5.656,8m³
- área da base: 259,85 m²



Figura 28 – Silos planos metálicos verticais

Aeradores: cada silo possui um conjunto fixo de aeradores, formado por um motor de indução, trifásico, 30cv, 4 polos, 380V, 60Hz, 1765rpm, fabricação WEG; e um ventilador com rotor de pás retas, inclinadas para trás, com característica de consumo constante para uma mesma rotação de operação, modelo RLS-710, arranjo 4, fabricação OTAM – Ventiladores Industriais Ltda, conforme Figura 29.



Figura 29 - Aerador (conjunto motor-ventilador)

Os aeradores estão dimensionados para atender, em condições nominais (1765 rpm), aos seguintes grãos:

- soja: vazão de ar igual a $33.450\text{m}^3/\text{h}$; pressão estática de 102,5mmca; vazão específica de $0,1115\text{m}^3/\text{min.m}^3$;
- milho: vazão de ar igual a $31.100\text{m}^3/\text{h}$; pressão estática de 130mmca; vazão específica de $0,104\text{m}^3/\text{min.m}^3$;
- arroz: vazão de ar igual a $25.350\text{m}^3/\text{h}$; pressão estática de 200mmca; vazão específica de $0,0845\text{m}^3/\text{min.m}^3$;
- trigo: vazão de ar igual a $22.950\text{m}^3/\text{h}$; pressão estática de 222,3mmca; vazão específica de $0,0765\text{m}^3/\text{min.m}^3$.

Quadro de proteção e comando dos motores de aeração: neste quadro - conforme Figura 30 - estão montados os circuitos de comando e proteção dos motores de aeração; possui uma chave seletora para definir o tipo de operação: manual, automática ou bloqueada.

No tipo de operação manual os motores são ligados e desligados pelo operador; no tipo automático, os motores são ligados e desligados pelo módulo remoto de motores e a posição bloqueada permite a execução de manutenção nos motores e ventiladores de forma segura.



Figura 30 - Quadro de proteção e comando dos motores de aeração

Medidor de umidade: antes de serem introduzidos nos silos, são realizadas coletas de amostras dos grãos para determinação do percentual de impurezas e umidade. Durante o processo de conservação é recomendável que sejam feitas verificações da umidade do grão pelo menos uma vez por semana. O medidor utilizado pela Empresa é o apresentado na Figura 31, modelo Universal Moisture Tester, de fabricação Vicar – Manufatura de Máquinas Industriais Ltda.



Figura 31 – Medidor de umidade

4.2 Sistema de Termometria

Os silos de armazenagem possuem um sistema de termometria instalado de acordo com o diagrama de ligação - Figura 32 - com a função de captar e transmitir informações, em tempo real, sobre as condições de temperatura em todos os pontos estratégicos da massa de grãos, temperatura ambiente, umidade relativa do ar e chuva, além de conduzir, segundo o equilíbrio higroscópico do grão e condições de conservação pré-estabelecidas pelo operador, o controle do processo de armazenamento e conservação.

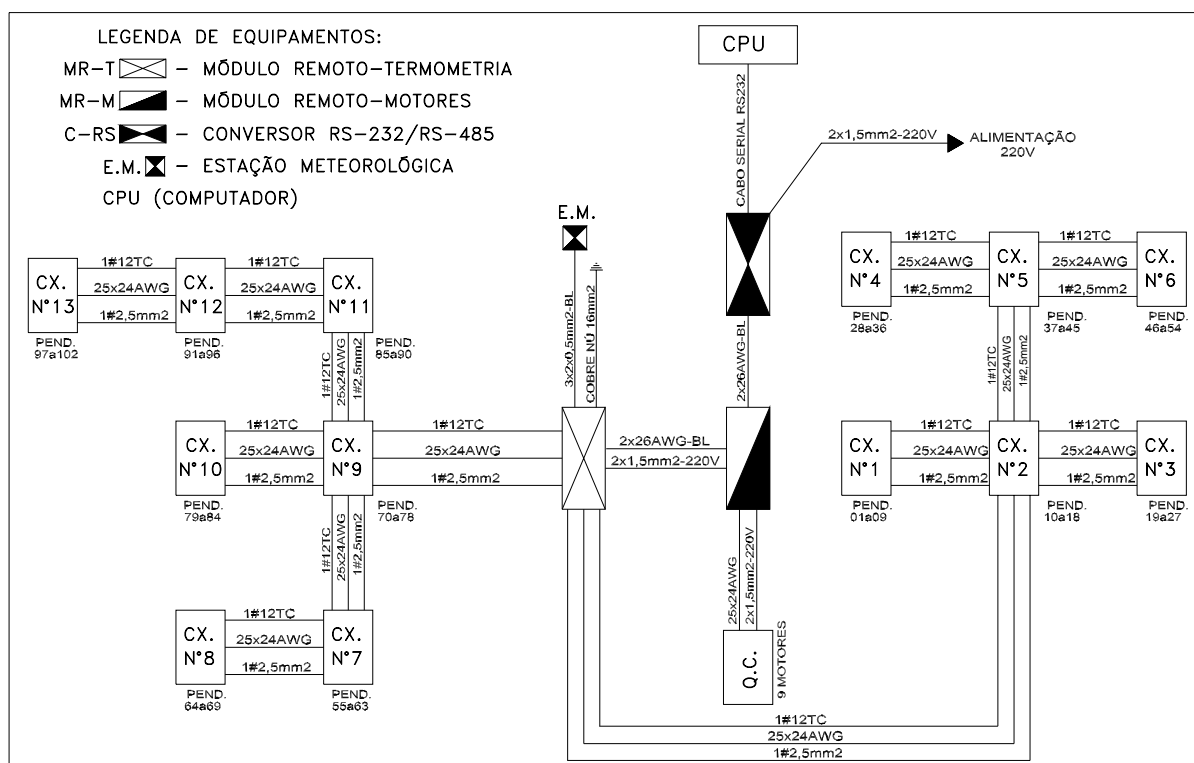


Figura 32 - Diagrama de ligação dos cabos de termometria

Cabos termométricos e sensores de temperatura: a temperatura da massa de grãos é captada por meio de cabos termométricos contendo sensores de temperatura, distribuídos no interior dos silos conforme mostra a Figura 33. Os sensores de temperatura são constituídos pela junção de fios de cobre e de constantan, os quais fornecem a indicação real de temperatura através de um sinal elétrico que será decodificado pelo sistema. O tipo de sensor aplicado é o termopar tipo “T” (cu-co), com faixa de variação de 0 a 4,27 mv (0 a 100°C), norma IEC 584.

Em cada silo estão instalados cinco cabos termométricos, sendo quatro deles distribuídos de maneira uniforme, próximos às paredes, contendo dez sensores de temperatura cada; e um instalado no ponto central, contendo onze sensores.

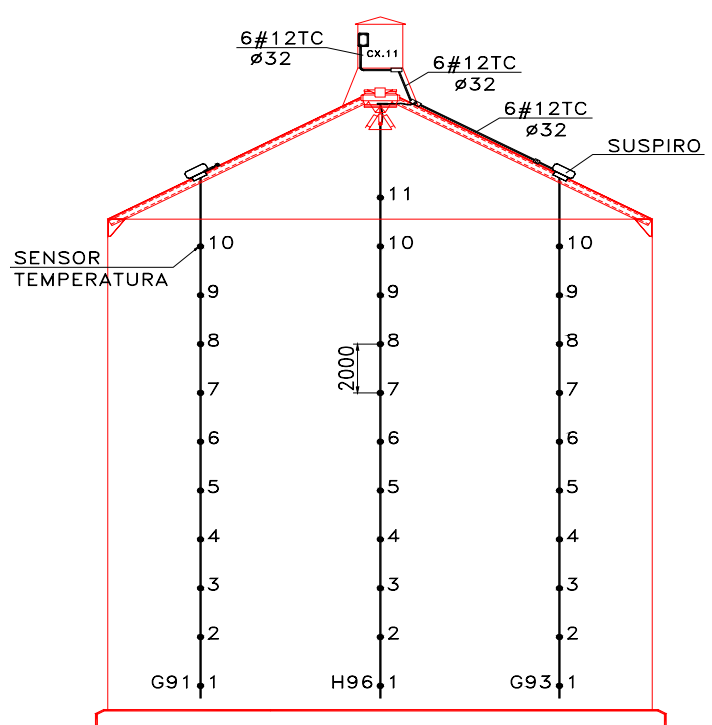


Figura 33 - Localização dos sensores de temperatura no interior dos silos

Caixas de comutação: nestas caixas são conectados todos os cabos termométricos com seus respectivos pontos sensores. Estão instaladas junto aos silos e contêm os dispositivos para seleção dos sinais gerados pelos cabos termométricos. Através dessas caixas são enviados os sinais elétricos multiplexados ao módulo remoto de termometria.

Estação meteorológica: a estação meteorológica (Figura 34) é composta de pedestal e transdutor de umidade relativa, temperatura ambiente e sensor de chuva. O modelo HIGROCLIP instalado possui as seguintes características técnicas:

- range de medição de umidade 0 a 100 ur;
- range de medição de temperatura -40 a +85°C;
- sinal 0 a 10Vcc;
- alimentação 3,5 a 50Vcc;
- precisão de umidade a 23°C de aproximadamente 1,5ur;
- precisão de temperatura a 23° de aproximadamente 0,3°C.

A estação meteorológica fornece informações, em tempo real, sobre a situação do ambiente externo do sistema e tais informações são enviadas ao módulo remoto termometria.



Figura 34 - Estação meteorológica com sensor de chuva

Módulo remoto termometria: este módulo realiza a leitura da temperatura a partir de sinais emitidos pelas caixas de comutação e da estação meteorológica. Esses sinais são enviados ao computador que, através do *software* AIRMASTER, executa o gerenciamento da temperatura da massa de grãos armazenada.

Módulo remoto motores: realiza o controle e comando dos motores de aeração a partir de sinais recebidos do *software* AIRMASTER.

Módulo conversor: este módulo é conectado ao computador e tem a finalidade de converter e isolar, opticamente, os sinais da RS-232 para RS-485, utilizando-se de uma transmissão diferencial sobre uma linha balanceada conforme a necessidade de cada unidade armazenadora.

Software AIRMASTER 2002, versão 3.0: este *software* – Figura 35 - realiza o gerenciamento do sistema de termometria e acionamento dos motores de aeração. Foi desenvolvido pelo Grupo FOCKINK para uso em microcomputador, utilizando-se de linguagem Borland Delphi, com gerenciador de banco de dados Interbase.

O sistema trabalha em plataforma Windows, exigindo uma configuração mínima de 64 MB de memória RAM e 50 MB de disco rígido.

Possui integração com os módulos de aeração e termometria através de um conversor RS-232/RS-485 que possibilita a leitura e registro de dados tais como temperatura, umidade, número de horas de funcionamento dos motores dos aeradores, entre outros.

A operacionalização é realizada através de mouse ou teclado, permitindo o acesso aos itens de menu disponíveis nas telas, com possibilidades de visualização e impressão de séries históricas, gráficos e relatórios, bem como da exportação desses dados através da criação de arquivos com extensão XLS.

O *software* executa programação individual para cada silo, permitindo variação de estratégias conforme o equilíbrio higroscópico de cada tipo grão. Os históricos das leituras de temperatura e controles efetuados sobre os motores são mantidos em arquivos diários para análise através de gráficos e relatórios.

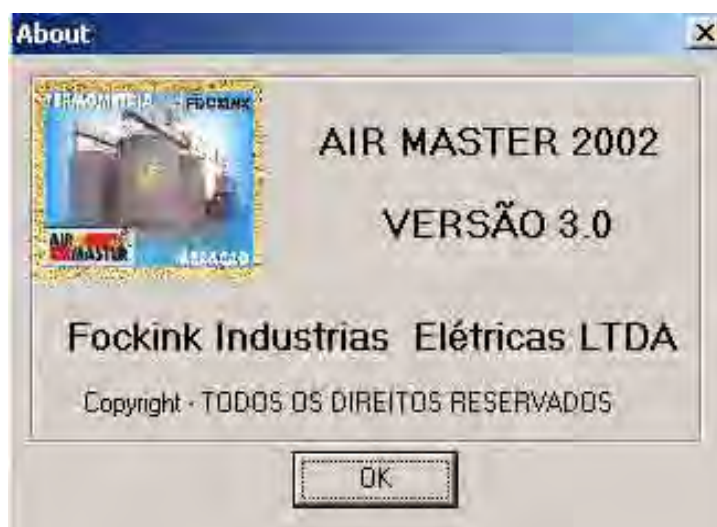


Figura 35 - Software AIRMASTER 2002

4.3 Software MAEV2000 – Versão 2

O *software* MAEV2000, Figura 36, desenvolvido para uso em microcomputador pela empresa OTAM – Ventiladores Industriais Ltda, efetua o

dimensionamento de ventiladores, sendo normalmente utilizado por empresas que instalam sistemas de armazenagem de grãos, como ferramenta para tal dimensionamento. Estão entre os dados solicitado pelo *software*:

- tipo de fluido;
- condições de operação, temperatura e pressão atmosférica;
- tipo de ventilador que se deseja instalar ou que esteja instalado;
- condições de funcionamento desejadas (vazão, pressão estática, velocidade de descarga).

A partir dessas informações o MAEV2000 calcula o diâmetro do rotor do ventilador, a velocidade de rotação e apresenta as características e curva de desempenho do ventilador selecionado, funcionando segundo as condições especificadas.



Figura 36 - *Software* MAEV2000

4.4 Caracterização do Experimento

Para realização deste experimento foram utilizados dois silos, aqui denominados “silo 11” e “silo 12”. Em cada silo foram armazenados 5.000m³ de soja, com teor de impureza de 0,9% e umidade de 13,5%. O término do processo de enchimento dos

silos 12 e 11 ocorreu, respectivamente, na primeira semana e segunda quinzena do mês de março de 2004.

O silo 11 foi definido como silo padrão, com o aerador funcionando em condições nominais, ou seja, 380V, 60Hz e 1765rpm; no quadro de proteção e comando, circuito elétrico do aerador deste silo, foi instalado um analisador de energia, modelo MD-2010, de fabricação EMBRASUL.

No circuito elétrico de alimentação do aerador do silo 12, além de instalado analisador de energia, nas mesmas condições do instalado para o silo 11, foi feita a implementação para controle de velocidade do aerador, através de inversor de frequência, modelo CFW-09, de fabricação WEG.

A Figura 37 mostra as ligações dos analisadores de energia e inversor de frequência, nos circuitos alimentadores dos aeradores.



Figura 37 - Ligações dos analisadores de energia e inversor de frequência

Durante o período do experimento, o aerador do silo 12 foi ajustado para funcionamento em quatro estágios de frequência/rotação:

- 48Hz (1.405rpm) : período de 25/03/04 a 02/06/04;
- 45Hz (1.315rpm) : período de 03/06/04 a 22/07/04;
- 40Hz (1.165rpm) : período de 23/07/04 a 20/08/04;

- 35Hz (1.015rpm) : período de 21/08/04 a 22/10/04

Estes ajustes de frequência foram efetuados de forma manual, diretamente no inversor de frequência.

Antes de alterar as condições de funcionamento do aerador foi necessário verificar as características de desempenho do ventilador e, para isso, foram analisados fluxos de ar e pressão estática requeridos pela massa de grãos armazenada, utilizando-se do *software* MAEV2000 - versão 2, para dimensionamento de ventiladores, desenvolvido pela OTAM Ventiladores Industriais Ltda, além de observadas as recomendações sobre vazão específica mínima ($0,08\text{m}^3/\text{min.m}^3$) para aeração de grãos armazenados com umidade até 14% em silos planos e elevados, conforme especificado na Tabela 3.

4.4.1 Controle de Velocidade do Aerador

O controle de velocidade do aerador do silo 12 foi efetuado utilizando-se um inversor de frequência, modelo CFW-09, de fabricação WEG, conforme mostrado na Figura 38, com as seguintes características:



Figura 38 – Inversor de frequência, modelo CFW-09

- tensão trifásica, 380 volts (+10%, - 15%);
- frequência 60Hz (\pm 2Hz);
- desbalanceamento entre fases menor que 3%;
- fator de deslocamento 0,98;
- corrente nominal de saída do inversor em torque constante, 70 A;
- fonte chaveada;
- controle através de microcontrolador do tipo RISC (Reduced Instruction Set Code), 32 bits;
- com controle de velocidade escalar V/F;
- variação de frequência de 0 a 204Hz;
- porta de comunicação serial RS-232, que permite acesso aos parâmetros de programação, para uso futuro, por *softwares* de supervisão e controle;
- interface homem-máquina com funções de comando e supervisão (leitura):
 - comando: liga/desliga, parametrização (programação de funções gerais), incremento/decremento de velocidade, inversão de rotação e seleção de comando local ou remoto;
 - supervisão: referência de velocidade (rpm), velocidade no motor (rpm), frequência de saída no motor (Hz), torque no motor (%), potência de saída no motor (kW), corrente de saída no motor (A), tensão de saída no motor (V), horas de funcionamento (h).

Não obstante a possibilidade de controle à distância, a parametrização e os ajustes de frequência foram efetuados de forma manual, diretamente no inversor.

O inversor de frequência funcionou, também, como dispositivo de partida para o motor do aerador do silo 12 e, com isso, a chave compensadora de partida dos aeradores foi desconectada do circuito do aerador deste silo, sendo utilizada somente para partida dos outros aeradores, conforme diagrama unifilar, Figura 39.

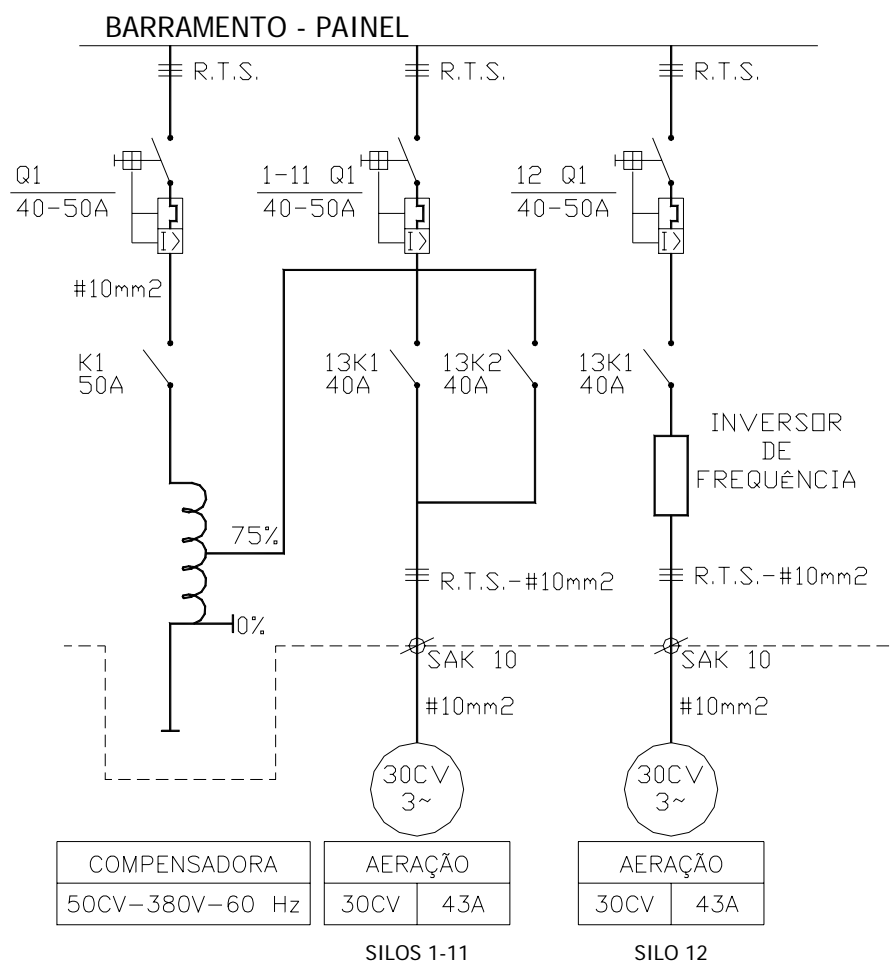


Figura 39 - Diagrama unifilar - alimentação dos aeradores

4.5 Medições de Parâmetros Elétricos

Utilizando-se de analisadores de energia, modelo RE-2000 (Figura 40), foram efetuadas medições de parâmetros elétricos durante o funcionamento dos aeradores dos silos 11 e 12. O analisador de energia RE-2000 é um medidor/registrador digital, em tempo real, de grandezas elétricas e possui memória interna tipo RAM para armazenagem de dados e posterior transferência/análise em microcomputador. Tal transferência de dados se dá diretamente entre o RE-2000 e um microcomputador, através do *software* AN1000, que permite:

- geração e/ou impressão de gráficos e relatórios de dados coletados;
- simulação de banco de capacitores;

- programação de parâmetros do RE-2000.



Figura 40 - Analisador de energia, modelo RE-2000

A coleta de dados pode ser realizada via display/teclado numérico e de funções do RE-2000, ou através da interface de comunicação serial RS-232, compatível com PC-XT, PC-AT, padrão IBM, sistema operacional Windows 95 ou superior.

Para o experimento, os analisadores de energia foram programados para medições e registro a cada 30 segundos, dos seguintes parâmetros:

- potência ativa (kW);
- potência reativa (kVAr);
- fator de potência;
- corrente (A);
- tensão (V);
- demanda (kW);

Após a transferência dos dados registrados no RE-2000 para o microcomputador, tais dados foram exportados para o Microsoft Excel 2002, e através deste, calculadas as correntes máximas e mínimas nas três fases medidas, as tensões máximas e mínimas também nas três fases medidas, a potência ativa máxima e mínima, a potência reativa máxima e mínima, a demanda máxima e mínima, as médias das demandas a cada 15 minutos,

as demandas máxima e mínima das médias de demanda calculadas a cada 15 minutos, o fator de potência, bem como a tabulação e confecção de gráficos diversos sobre os dados coletados.

4.6 Medição e Análise de Dados de Termometria

O *software* AIRMASTER, que realiza o gerenciamento do sistema de aeração, fez a leitura dos dados em tempo real, com registro automático pré-programado da seguinte maneira:

- temperatura ambiente, umidade relativa do ar e sensor de chuva: registro a cada 30 minutos;
- temperatura do grão no interior dos silos: registro diário às 09:00h e 21:00h, ou conforme programação do operador;

Para análise, esses dados foram organizados em planilhas do Microsoft Excel e separados para cada estágio do experimento:

- temperatura ambiente e umidade relativa do ar: média aritmética dos valores registrados a cada 30 minutos, em intervalos de 09:00h às 20:59h e de 21:00h às 08:59h;
- sensor de chuva: conforme ocorrência dentro dos intervalos de 09:00h às 20:59h e de 21:00h às 08:59h;
- funcionamento dos aeradores: somatório dos valores registrados dentro dos intervalos de 09:00h às 20:59h e de 21:00h às 08:59h;
- temperatura do grão (massa): média aritmética dos valores registrados nos vários pontos da massa de grãos em dois horários diários: 09:00h e 21:00h;
- evolução do consumo de energia elétrica;
- comportamento dos parâmetros elétricos de tensão, corrente e fator de potência;
- evolução do funcionamento dos aeradores.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

O término do enchimento dos silos 12 e 11 ocorreu, respectivamente, na primeira e última semanas do mês de março de 2004, com diferença de vinte dias entre um e outro. Os grãos armazenados se encontravam secos, apresentando umidade em torno de 13%. Durante o enchimento dos silos e após sua conclusão, a massa de grãos passou pelo processo de resfriamento, pelo método de insuflação do ar. Na aeração de resfriamento por insuflação, o ar frio é forçado através da massa, formando uma zona de resfriamento (transição) que se move na direção do fluxo do ar, resfriando, sucessivamente, as camadas seguintes. Entretanto, antes que o processo de resfriamento seja completado, as camadas acima da zona de transição tendem a se aquecer devido ao calor retirado das camadas inferiores. A temperatura final do grão ou temperatura de armazenamento, varia conforme a região onde está localizado o silo. No Brasil, para regiões frias, as temperaturas de armazenamento estão compreendidas entre 15°C e 20°C, enquanto que para regiões quentes, entre 20°C e 25°C.

As Figuras 41 e 42 mostram o comportamento da temperatura na massa de grãos do experimento, em ambos os silos, no dia 28/03/2004 às 21:00h.

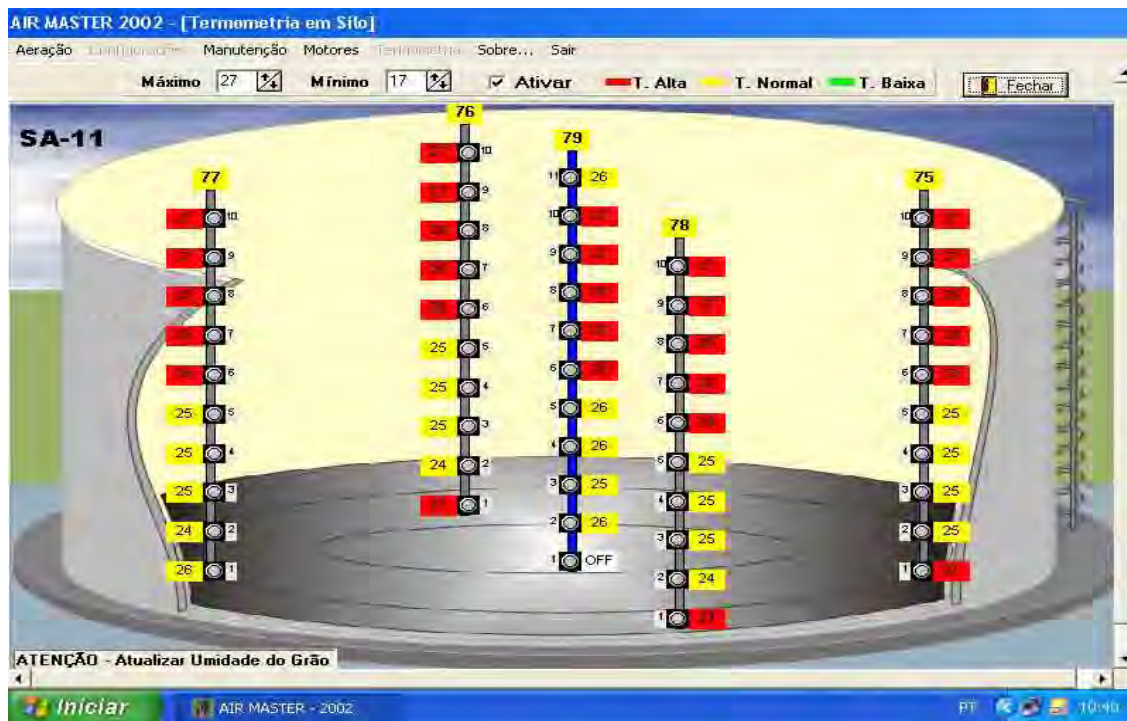


Figura 41 - Temperatura no interior do silo 11 – 28/03/04 – 21:00h

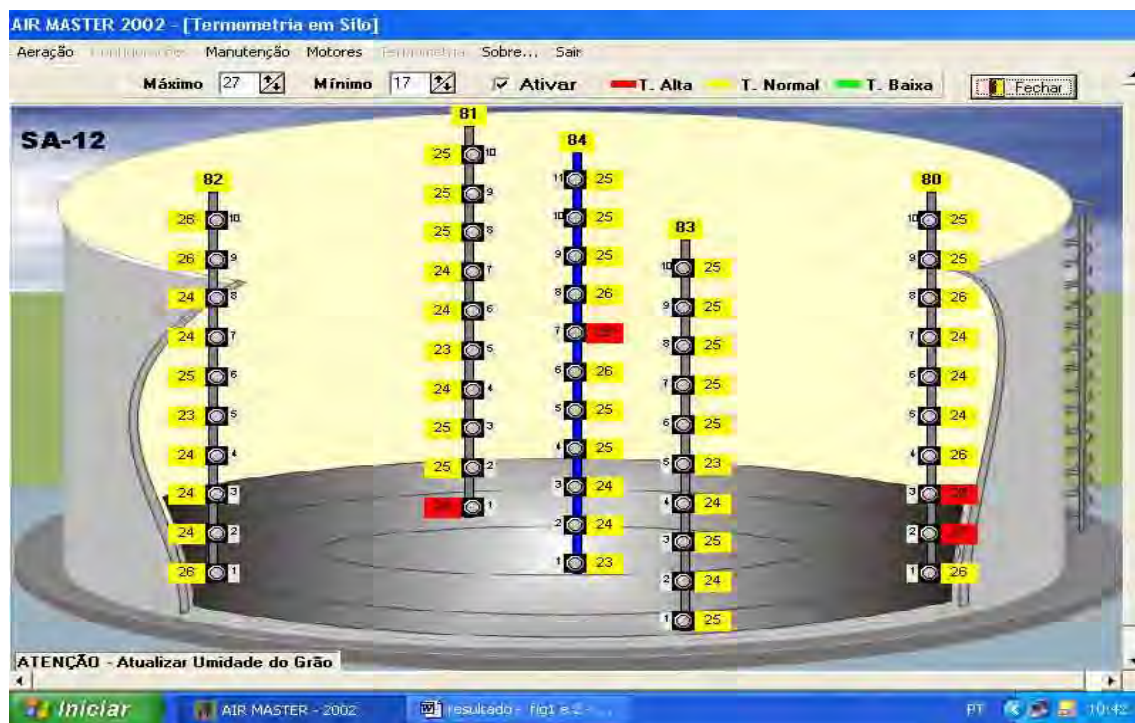


Figura 42 - Temperatura no interior do silo 12 – 28/03/04 – 21:00h

Conforme pode ser observado, as temperaturas de armazenamento pré-definidas para toda a massa de grãos, consideradas como normais, estiveram compreendidas entre 17°C a 27°C. Essa definição foi efetuada, manualmente, pelo operador do sistema, sendo compatível com a temperatura média da região.

Os pontos amarelos apontam locais, no interior dos silos, onde a temperatura dos grãos é considerada normal, ou seja, dentro da faixa de temperatura esperada e, os pontos em vermelho, indicam grãos com temperatura elevada, superior à máxima admitida. Observa-se que a quantidade de pontos onde os grãos se encontram com temperatura elevada no silo 11 é muito superior se comparada ao silo 12 e isso se justifica pelo fato do processo de resfriamento da massa de grãos estar em andamento e, até aquele momento (28/03/04, às 21:00h), o tempo de funcionamento do aerador do silo 12 ter sido maior que o do silo 11 - 212,19 horas e 172,5 horas, respectivamente.

5.1 Tempo de Aeração de Resfriamento

O tempo de um ciclo completo de aeração não é fixo, dependendo, principalmente, das características do grão: umidade e temperatura, umidade e temperatura do ar, vazão específica para aeração e espessura da camada de grãos. Entretanto, a aeração deve ser mantida até que toda a massa de grãos esteja a uma temperatura uniforme, o mais baixa possível.

Uma vez que o tempo de aeração de resfriamento depende da vazão específica para aeração, utilizando-se do *software* MAEV-2000, foram obtidas as características de desempenho dos aeradores dos silos de acordo com o funcionamento dos mesmos.

Para o silo 11, que durante todo o experimento funcionou em condições nominais, ou seja, 60Hz – 1765 rpm, a Tabela 8 e a Figura 43 apresentam as características de desempenho do ventilador.

Tabela 8 – Característica de desempenho do ventilador RLS-710 – 60Hz

Parâmetros	Valor obtido
Vazão (Q)	33.534 m ³ /h
Pressão estática (Δp_g)	102,5 mmca
Pressão total (Δp)	135,1 mmca
Velocidade de descarga	23,0 m/s
Rendimento	64,6 %
Rotação	1.765 rpm
Potência absorvida	25,89 cv

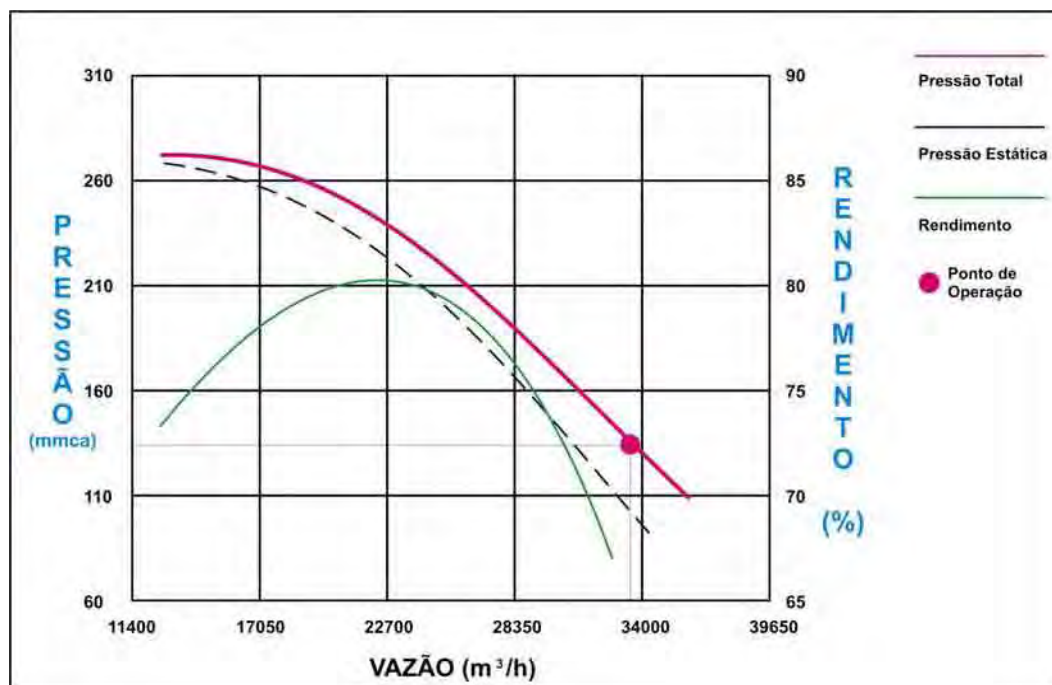


Figura 43 - Curva de desempenho do ventilador RLS-710 - 60Hz (1.765rpm)

Para esse tipo de ventilador, a zona de operação mais eficiente situa-se entre 50% e 60% da vazão máxima, ou seja, rendimento de 82% para uma vazão de 22.700m³/h e 235mmca de pressão total. O rendimento de 64,6% para o ventilador do experimento mostra que nesta armazenagem de soja, o conjunto ventilador-motor está superdimensionado.

De acordo com a Tabela 8, observa-se que a vazão total de ar produzida pelo aerador na condição nominal é $Q = 33.534 \text{ m}^3/\text{h}$, para 5.000 m^3 de grãos de soja armazenada; vazão específica $Q' = 0,1118 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^3$ de grão, sendo superior à vazão específica de referência para aeração em silos planos e elevados, ou seja, $0,08 \text{ m}^3/\text{min} \cdot \text{m}^3$, conforme Tabela 3.

Considerando:

$$S: \text{ seção do silo} = 259,85 \text{ m}^2$$

$$ra: \text{ massa específica do ar} = 1,15 \text{ kg/m}^3$$

$$rg: \text{ massa específica do grão} = 750 \text{ kg/m}^3$$

$$ca: \text{ calor específico do ar} = 1,0 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

$$cj: \text{ calor específico do grão} = 1,67 \text{ kJ/kg } ^\circ\text{C}$$

Através da equação (6), obtém-se a velocidade do ar (v_a):

$$v_a = 129,05 \text{ m/h}$$

Através da equação (7), obtém-se a velocidade de propagação da zona de resfriamento (v_g):

$$v_g = 0,1185 \text{ m/h}$$

Uma vez que o volume de grãos armazenados nos silos é de 5000 m^3 , a altura da camada de grãos será de $19,2 \text{ m}$, e através da equação (5), obtém-se o tempo necessário para a zona de resfriamento efetuar o percurso em toda a massa de grãos (1 ciclo):

$$t_H = 162,02 \text{ horas}$$

Segundo Lasseran (1981), e conforme Puzzi (1986), o tempo provável para o resfriamento completo da massa de grãos, ou tempo de aeração – dado pela equação (8) – será:

$$t_{\text{aer}} = 486,06 \text{ horas ou } 25,31 \text{ h/m}$$

Para o aerador funcionando em 48 Hz , 1405 rpm , a Tabela 9 apresenta as características de desempenho do ventilador.

Tabela 9 – Característica de desempenho do ventilador RLS-710 – 48Hz

Parâmetros	Valor obtido
Vazão (Q)	26.603 m ³ /h
Pressão estática (Δp_g)	65,0 mmca
Pressão total (Δp)	85,6 mmca
Velocidade de descarga	18,3 m/s
Rendimento	64,6 %
Rotação	1.405 rpm
Potência absorvida	13,04 cv

Obtém-se para essa condição de funcionamento do aerador:

$$Q' = 0,0887 \text{ m}^3/\text{min.m}^3$$

$$v_a = 100,4 \text{ m/h}$$

$$v_g = 0,0922 \text{ m/h}$$

$$t_H = 208,24 \text{ h}$$

$$t_{\text{aer}} = 625,12 \text{ horas ou } 32,56 \text{ h/m}$$

Com o motor do aerador do silo 12 funcionando a 48Hz, 1.405rpm, redução de 20% da velocidade nominal, a vazão específica foi reduzida praticamente na mesma proporção, entretanto suficiente para aeração de grãos secos com teor de umidade até 14%, ou seja, 0,08m³/h.m³, conforme Tabela 3.

Com relação ao tempo de aeração de resfriamento, mesmo teórico, observa-se ser necessário aumento de 28,61% (139,06 horas) no número de horas de funcionamento do aerador do silo 12 se comparado com o número de horas de funcionamento do aerador do silo 11. Entretanto, se observada a potência requerida pelos dois aeradores, conforme apresenta as Tabelas 8 e 9, constata-se uma previsão de redução da ordem de 35,2% no consumo de energia elétrica do silo 12 em relação ao silo 11, durante o processo de resfriamento dessa massa de grãos.

Para o aerador funcionando em 45Hz, 1.315rpm, a Tabela 10 apresenta as características de desempenho do ventilador.

Tabela 10 – Característica de desempenho do ventilador RLS-710 – 45Hz

Parâmetros	Valor obtido
Vazão (Q)	24.790 m ³ /h
Pressão estática (Δp_g)	58,0 mmca
Pressão total (Δp)	75,9 mmca
Velocidade de descarga	17,0 m/s
Rendimento	65,1 %
Rotação	1.315 rpm
Potência absorvida	10,69 cv

Nesta condição de funcionamento do aerador, tem-se:

$$Q' = 0,0826 \text{ m}^3/\text{min.m}^3$$

$$v_a = 95,40 \text{ m/h}$$

$$v_g = 0,0876 \text{ m/h}$$

$$t_H = 219,2 \text{ h}$$

$$t_{\text{aer}} = 657,59 \text{ horas ou } 34,25 \text{ h/m}$$

Para o aerador do silo 12 funcionando em 45Hz, 1.315rpm, redução de 25% da velocidade nominal, a vazão específica foi reduzida na mesma proporção e também suficiente para aeração de resfriamento de grãos secos com teor de umidade de até 14%.

O tempo de aeração de resfriamento da massa de grãos para o silo 12, calculado nesta situação, foi 35,3% (171,53 horas) superior ao número de horas determinadas para o funcionamento do silo 11. Entretanto, verificando a potência requerida pelos dois aeradores, conforme Tabelas 8 e 10 - 25,89cv para o silo 11 e 10,69cv para o silo 12 - verifica-se que a previsão de redução no consumo de energia elétrica para o silo 12, durante o tempo de resfriamento da massa de grãos de soja, passa para 44,14%.

Para o aerador funcionando em 40Hz, 1.165rpm, a Tabela 11 apresenta as características de desempenho do ventilador.

Tabela 11 – Característica de desempenho do ventilador RLS-710 – 40Hz

Parâmetros	Valor obtido
Vazão (Q)	21.817 m ³ /h
Pressão estática (Δp_g)	46,7 mmca
Pressão total (Δp)	60,5 mmca
Velocidade de descarga	15,0 m/s
Rendimento	65,8 %
Rotação	1.165 rpm
Potência absorvida	7,44 cv

Nesta condição de funcionamento do aerador, tem-se:

$$Q' = 0,0727 \text{ m}^3/\text{min.m}^3$$

$$v_a = 83,93 \text{ m/h}$$

$$v_g = 0,0771 \text{ m/h}$$

$$t_H = 249,14 \text{ h}$$

$$t_{\text{aer}} = 747,43 \text{ horas ou } 38,93 \text{ h/m}$$

Para o aerador do silo 12 funcionando a 40Hz, 1.165rpm, a redução de velocidade é de 33,3% da velocidade nominal. A vazão específica calculada $Q' = 0,0727 \text{ m}^3/\text{min.m}^3$, apesar de não recomendada para aeração inicial de resfriamento em regiões de clima quente, pode ser utilizada para regiões que apresentam clima ameno ou frio, pois o tempo de desenvolvimento de microorganismos nestas regiões é mais lento.

A economia de energia elétrica prevista para esta condição é de 55,8%, sendo considerado apenas o tempo de aeração para resfriamento da massa de grãos. Não obstante a vazão específica para o aerador do silo 12, funcionando a 40Hz, 1.165rpm, não ser recomendada para aeração inicial de resfriamento em regiões quentes, poderá ser utilizada de forma segura para aeração de manutenção nessas regiões.

A máxima redução de velocidade do aerador, onde a resposta para aeração se demonstrou favorável, foi em 35Hz, 1.015rpm. A Tabela 12 apresenta as características de desempenho do ventilador.

Tabela 12 – Característica de desempenho do ventilador RLS-710 – 35Hz

Parâmetros	Valor obtido
Vazão (Q)	18.865 m ³ /h
Pressão estática (Δp_g)	36,5 mmca
Pressão total (Δp)	46,8 mmca
Velocidade de descarga	12,9 m/s
Rendimento	66,5 %
Rotação	1.015 rpm
Potência absorvida	4,92 cv

Nesta condição de funcionamento do aerador, tem-se:

$$Q' = 0,0629 \text{ m}^3/\text{min.m}^3$$

$$v_a = 72,58 \text{ m/h}$$

$$v_g = 0,0667 \text{ m/h}$$

$$t_H = 288,11 \text{ h}$$

$$t_{\text{aer}} = 864,34 \text{ horas ou } 45,02 \text{ h/m}$$

5.2 Consumo de Energia Elétrica

Durante todo o experimento, o aerador do silo 11 funcionou a 60Hz. O comportamento das potências ativa, reativa e aparente, verificados através de várias medições, manteve-se uniforme, com pequenas variações conseqüentes de oscilações de tensão e variações de temperatura ambiente.

A Tabela 13 apresenta esses valores e a Figura 44 mostra a curva de carga.

Tabela 13 - Parâmetros elétricos medidos - silo 11 (60Hz) – 25/03/04 a 22/10/2004.

Descrição	Valor medido		Unidade
	Máximo	mínimo	
Potência ativa	18,44	17,98	kW
Potência reativa	10,81	10,40	kVAr
Potência aparente	21,37	20,91	kVA
Fator de potência	0,948	0,668	-
Tensão fase A	388,78	346,80	V
Tensão fase B	388,56	348,66	V
Tensão fase C	385,03	346,70	V
Demanda (30s)	32,17	18,80	kW
Demanda (15 min)	18,44	17,98	kW

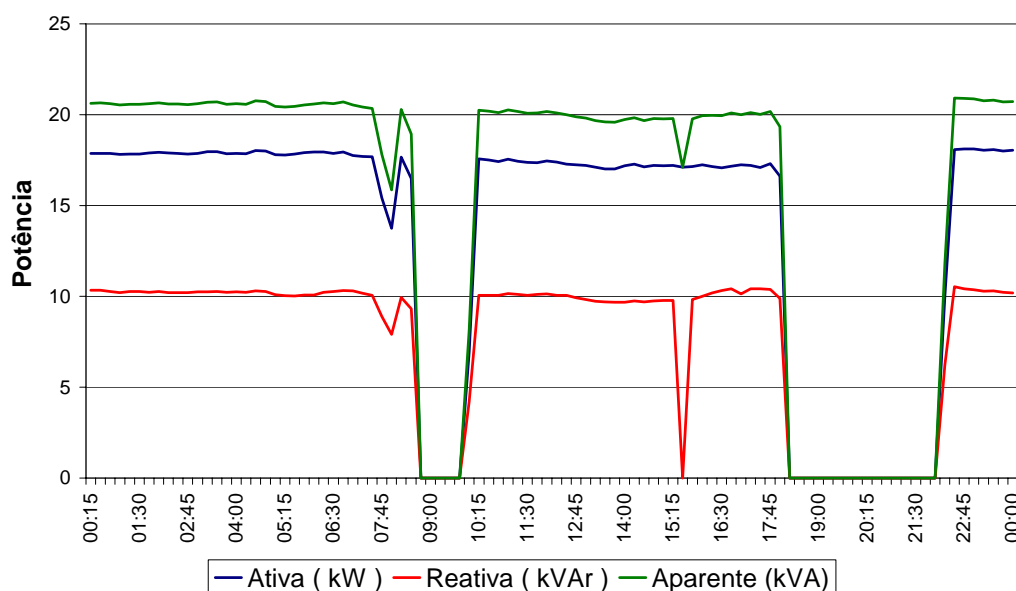


Figura 44 - Curva de carga do aerador do silo 11 - 60Hz, medição em 30/03/04

Para o aerador do silo 12 que durante o período do experimento funcionou em quatro estágios diferentes de frequência (48Hz, 45Hz, 40Hz e 35Hz), os

resultados obtidos estão apresentados na Tabela 14, e as Figuras 45, 46, 47 e 48 mostram as curvas de carga respectivas, verificadas em cada um dos estágios de frequência.

Tabela 14 - Parâmetros elétricos medidos - silo 12 – 25/03/04 a 22/10/04.

Frequência	Descrição	Valor medido		Unidade
		máximo	mínimo	
48 Hz	Potência ativa	10,54	10,06	kW
	Potência reativa	1,45	0,89	kVAr
	Potência aparente	10,57	10,10	kVA
	Fator de deslocamento	0,999	0,992	-
	Tensão fase A	391,80	349,48	V
	Tensão fase B	389,24	348,73	V
	Tensão fase C	385,10	345,94	V
	Demanda (30s)	10,80	10,11	kW
	Demanda (15 min)	10,54	10,06	kW
45 Hz	Potência ativa	8,92	8,74	kW
	Potência reativa	0,83	0,80	kVAr
	Potência aparente	8,93	8,81	kVA
	Fator de deslocamento	0,999	0,942	-
	Tensão fase A	384,80	363,13	V
	Tensão fase B	385,81	361,88	V
	Tensão fase C	386,78	363,88	V
	Demanda (30s)	9,18	8,94	kW
	Demanda (15 min)	8,92	8,74	kW
40 Hz	Potência ativa	6,32	6,24	kW
	Potência reativa	0,95	0,06	kVAr
	Potência aparente	6,44	6,25	kVA
	Fator de deslocamento	0,999	0,992	-
	Tensão fase A	388,06	354,98	V
	Tensão fase B	386,85	353,30	V
	Tensão fase C	381,24	349,91	V
	Demanda (30s)	6,47	6,41	kW
	Demanda (15 min)	6,32	6,24	kW
35 Hz	Potência ativa	4,53	4,46	kW
	Potência reativa	0,27	0,06	kVAr
	Potência aparente	4,54	4,46	kVA
	Fator de deslocamento	0,999	0,998	-
	Tensão fase A	391,03	358,02	V
	Tensão fase B	393,39	359,88	V
	Tensão fase C	394,32	360,10	V
	Demanda (30s)	5,28	4,46	kW
	Demanda (15 min)	4,53	4,44	kW

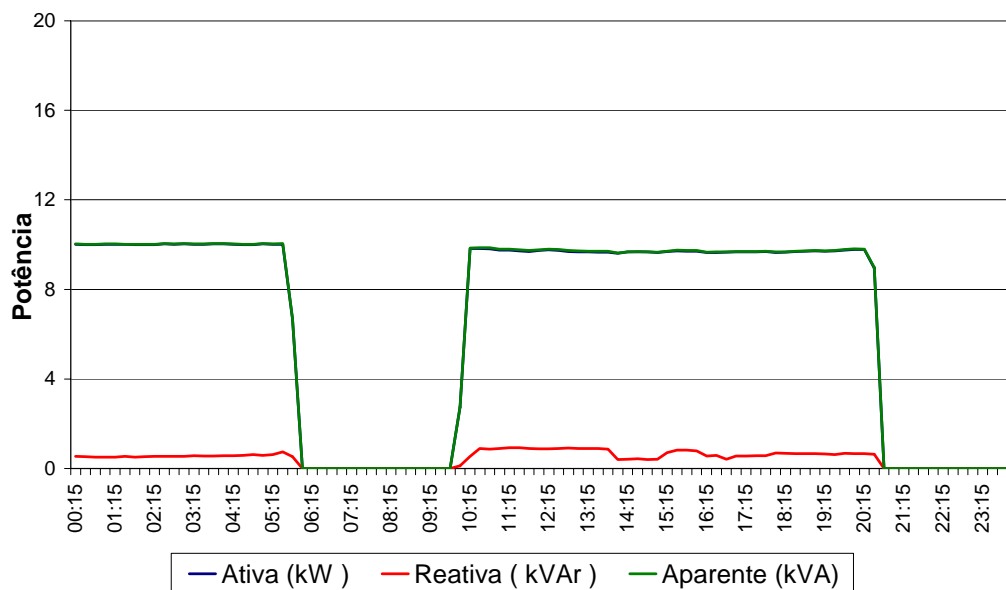


Figura 45 - Curva de carga do aerador do silo 12 – 48Hz, medição em 28/03/04

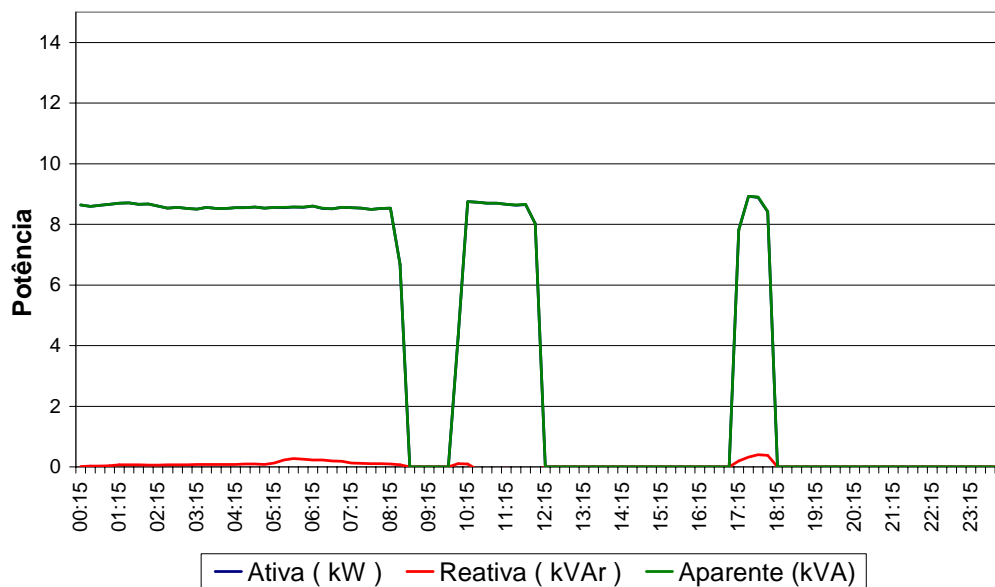


Figura 46 - Curva de carga do aerador do silo 12 – 45Hz, medição em 25/06/04

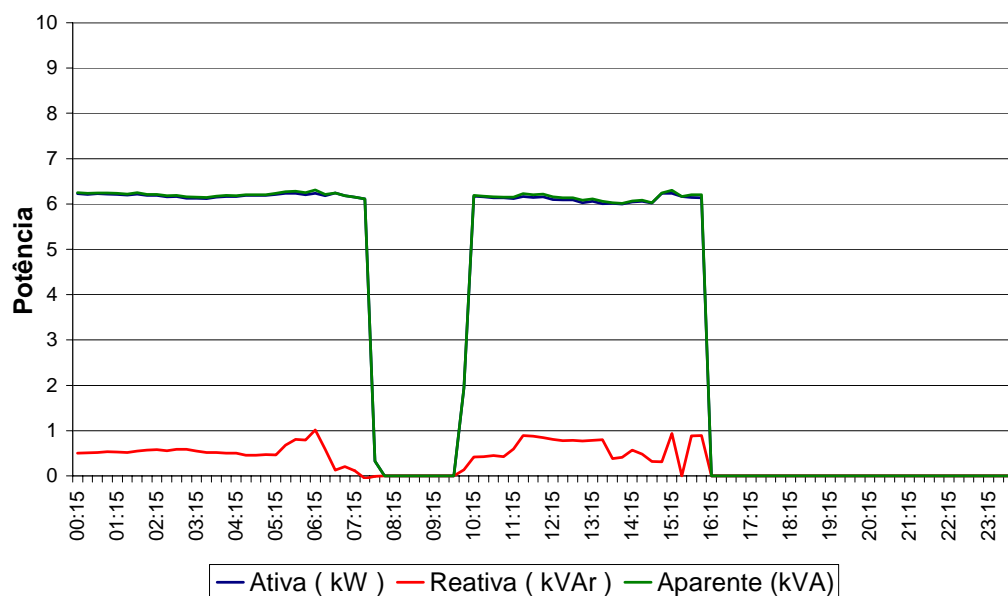


Figura 47 - Curva de carga do aerador do silo 12 – 40Hz, medição em 13/08/04

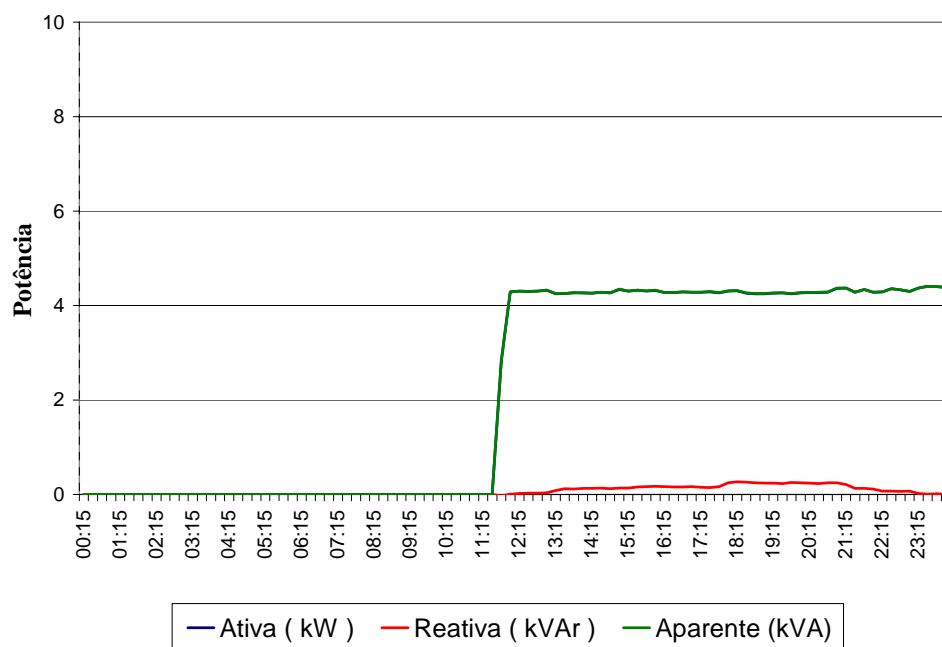


Figura 48 - Curva de carga do aerador do silo 12 – 35Hz, medição em 25/09/04

5.2.1 Consumo de Energia Elétrica por Período de Aeração

O consumo de energia elétrica varia em função do tempo de funcionamento dos aeradores, enquanto que o tempo de aeração varia em função das principais grandezas que influenciam o processo de armazenagem: temperatura e umidade do grão, e temperatura e umidade do ar externo.

5.2.1.1 Resultados obtidos – Silo 11 (60Hz) e silo 12 (48Hz) - Período de 25/03/2004 a 02/06/2004

O comportamento das grandezas temperatura e umidade relativa do ar externo obtido durante este período mostrou-se com variações bastante acentuadas e, por conseguinte, a análise foi efetuada considerando as médias dessas grandezas nos intervalos diurno (9:00h às 21:00h) e noturno (21:00h às 09:00h), conforme mostra a Figura 49.

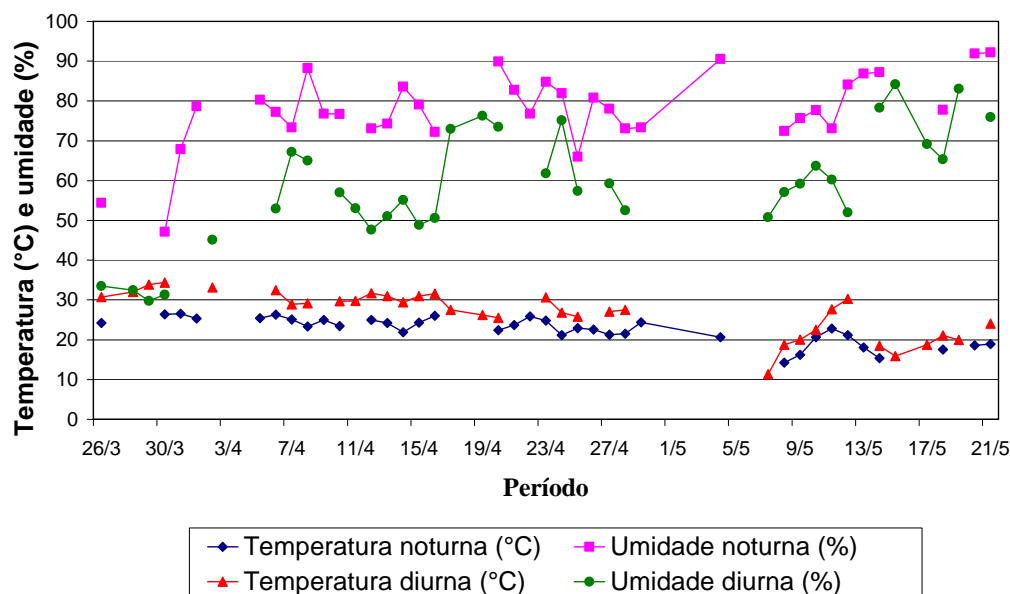


Figura 49 - Temperatura e umidade do ar externo – período de 25/03/04 a 02/06/04

Através dos dados de temperatura do ar externo apresentados, constata-se que a região onde se desenvolveu o experimento é uma região de clima quente,

com temperatura diurna oscilando entre 28 e 33°C, reduzindo-se para a faixa de 20 a 25°C no período noturno.

A umidade relativa do ar observada também oscila bastante nos intervalos diurno e noturno. Enquanto a umidade relativa do ar média diurna fica na faixa de 50 a 60%, no intervalo noturno sobe, permanecendo na faixa de 70 a 80%. Esse tipo de clima é indicativo de que para grãos armazenados com teor de umidade inferior a 14%, a aeração eficiente, via de regra, se processará no período noturno.

As Figuras 50 e 51 apresentam o comportamento da temperatura média da massa de grãos dos silos 11 e 12 em relação à temperatura ambiente, nos horários respectivos de 9:00h e 21:00h. Observando os resultados obtidos para o grão e comparando-os com aqueles de temperatura e umidade do ar externo (Figura 49), constata-se o quanto é significativa a influência da temperatura e umidade relativa do ar externo na temperatura da massa de grãos, principalmente quando essa massa ainda não se encontra devidamente resfriada.

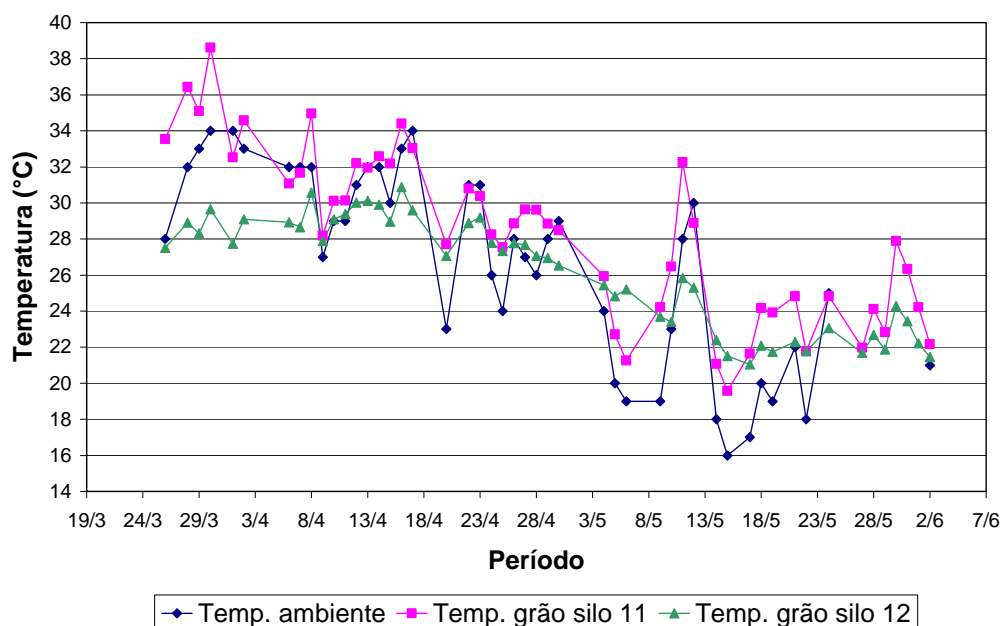


Figura 50 - Temperatura do grão e temperatura ambiente – 09:00h – 25/03/04 a 02/06/04

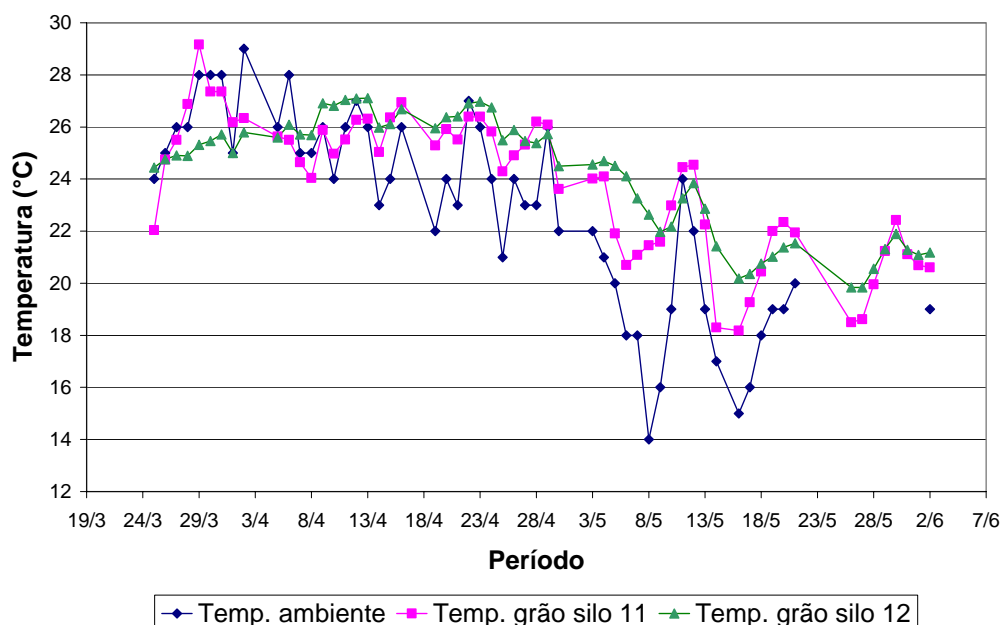


Figura 51 - Temperatura do grão e temperatura ambiente – 21:00h – 25/03/04 a 02/06/04

Considerando que para região de clima quente a temperatura de armazenamento deve permanecer na faixa de 20 a 25°C, observa-se, ainda, através das Figuras 50 e 51 que o resfriamento da massa de grãos de ambos os silos ocorreu simultaneamente, sendo mais acentuado a partir do início do mês de maio, com a característica de maior uniformidade para o silo 12.

A Figura 52 mostra a evolução do número de horas de funcionamento dos aeradores de ambos os silos, podendo ser observado que durante o período - em três intervalos (16/04 a 19/04, 29/04 a 04/05 e 21/05 a 02/06) - o funcionamento dos aeradores foi muito pequeno, sendo o excesso de umidade, em função das chuvas e extremamente prejudicial ao grão, o motivo para esse comportamento. O resultado obtido referente ao tempo de aeração foi de 399,5 horas para o silo 11 e de 434,4 horas para o silo 12. Não obstante ter sido verificado maior tempo de funcionamento do aerador do silo 12, se observados os valores de potência ativa consumida, medidos simultaneamente para os dois aeradores, conforme mostram as Tabelas 14 e 15, constata-se uma redução da ordem de 38,5% no consumo de energia elétrica para o silo 12, ou seja, enquanto o silo 11 consumiu 7.274,90kWh, o silo 12 consumiu 4.474,32kWh.

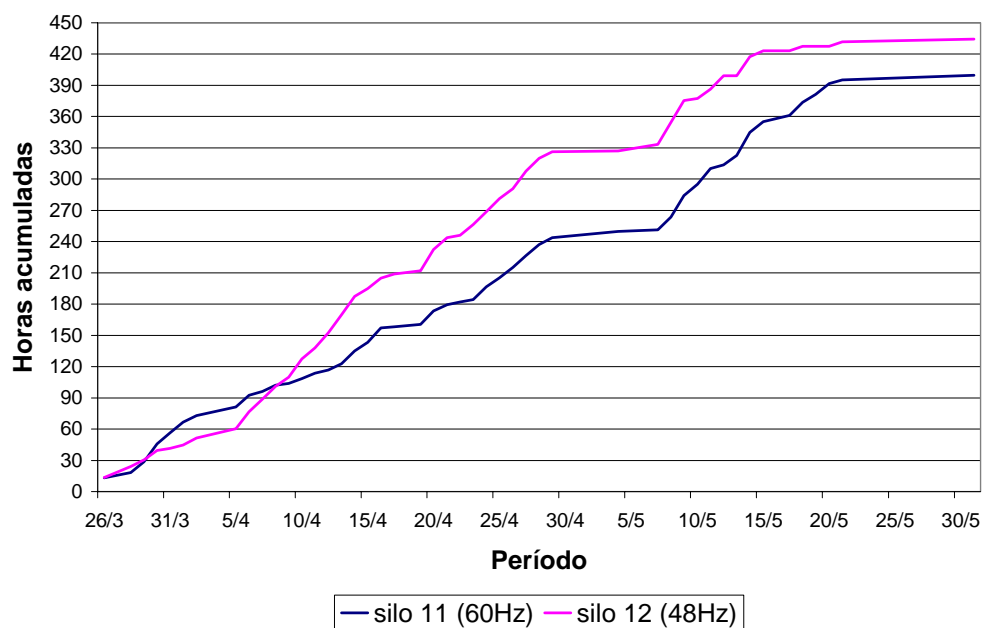


Figura 52 - Funcionamento dos aeradores dos silos 11 e 12 – 25/03/04 a 02/06/04

A Figura 53 apresenta o consumo de energia elétrica de ambos os silos no período, evidenciando a redução ocorrida para o silo 12.

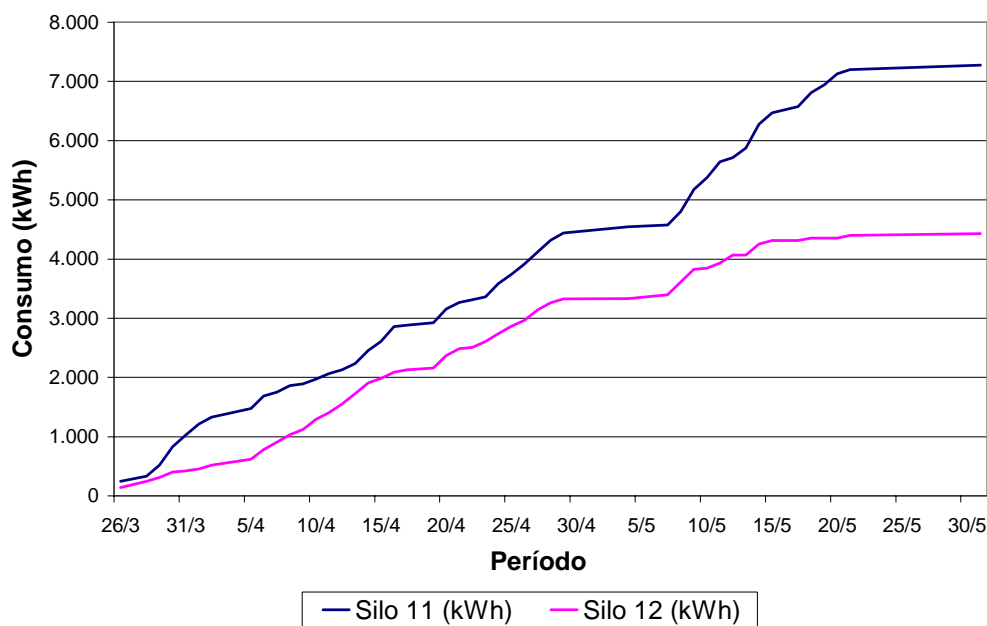


Figura 53 - Consumo de energia elétrica nos silos 11 e 12 – 25/03/04 a 02/06/04

As Figuras 54 e 55 mostram a temperatura da massa de grãos em ambos os silos no dia 02/06/04, às 21:00h. Os pontos em verde apresentam os locais em que os grãos estão resfriados abaixo do mínimo programado como normal.

Após vários dias de chuvas e com temperaturas muito baixas para a região (em média 18°C), a temperatura ambiente registrada neste horário foi de 19°C. O efeito da corrente de ar de convecção ainda é visível no silo 11, onde a temperatura dos grãos da região central é mais elevada que a daqueles situados próximos à superfície lateral do silo.

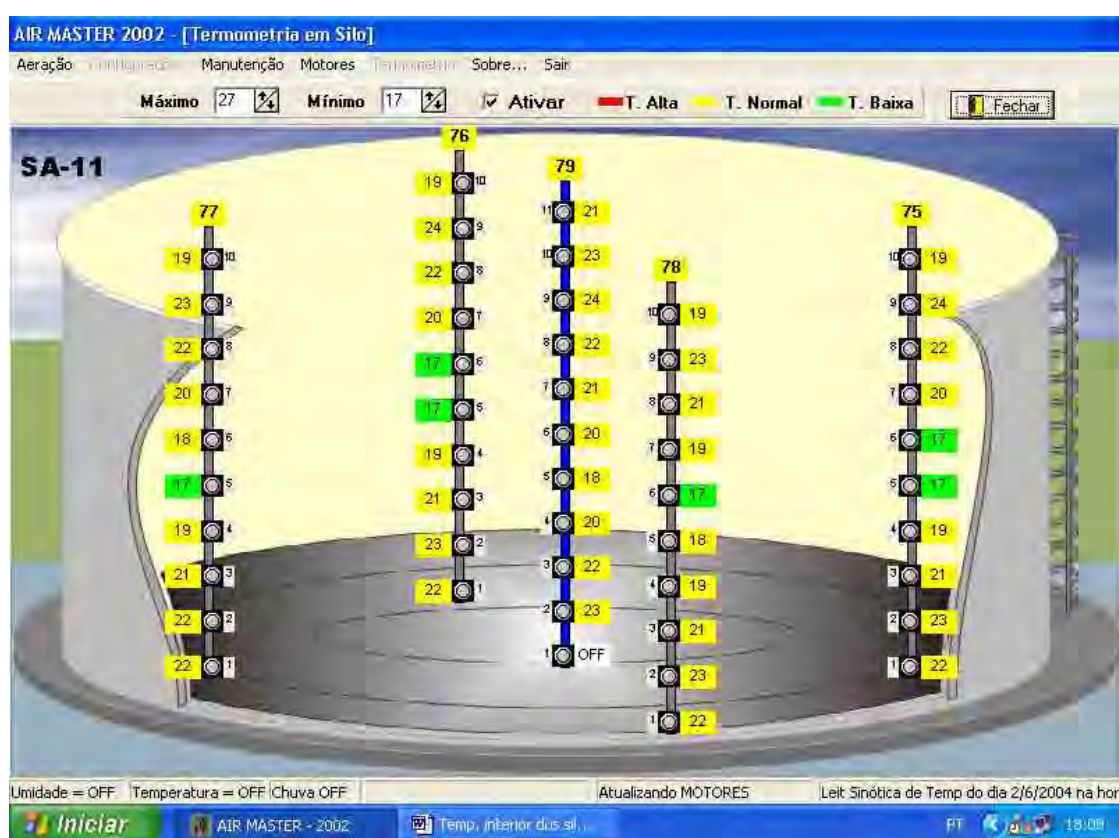


Figura 54 - Temperatura no interior do silo 11 – 02/06/04 – 21:00h

Para o silo 12 que recebe menor quantidade de ar frio em função da redução de velocidade do motor do aerador, a temperatura na massa de grãos apresenta-se mais uniformemente distribuída.

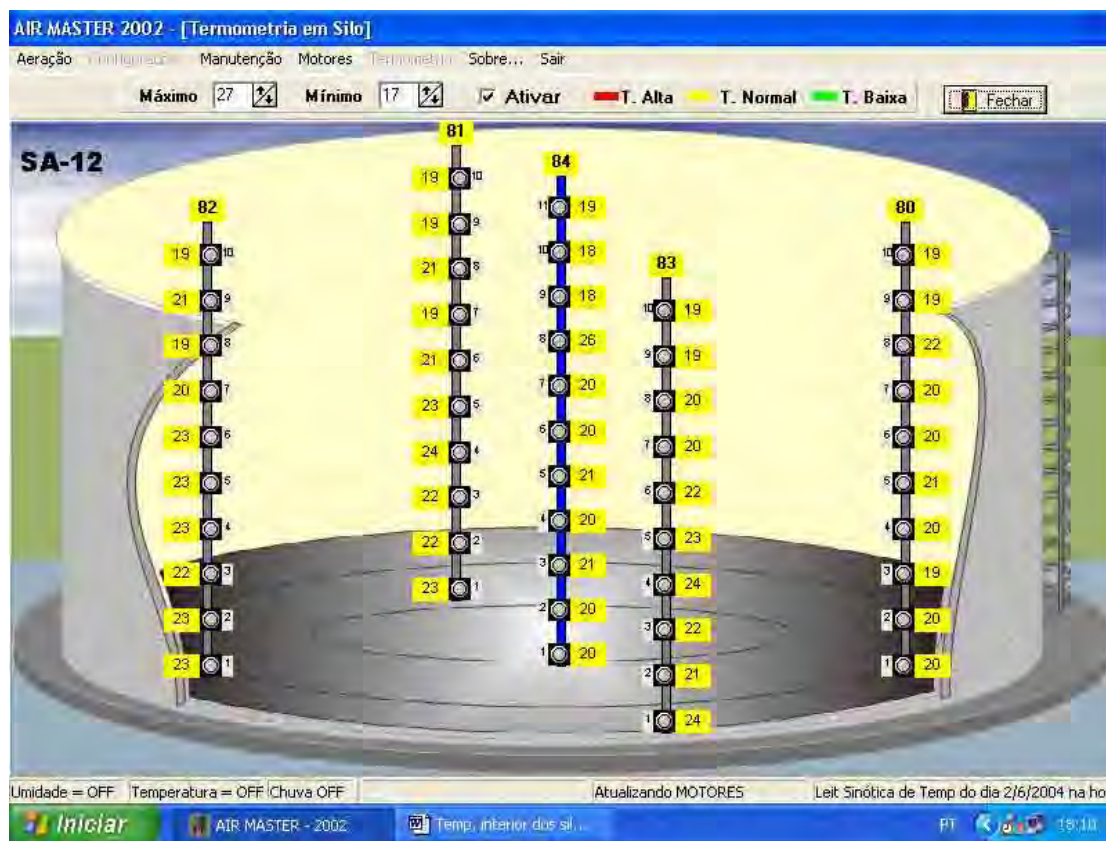


Figura 55 - Temperatura no interior do silo 12 – 02/06/04 – 21:00h

5.2.1.2 Resultados obtidos – silo 11 (60Hz) e silo 12 (45Hz) - período de 03/06/2004 a 22/07/2004

O comportamento das grandezas temperatura e umidade relativa do ar externo obtido durante este período está indicado na Figura 56. A análise foi efetuada considerando as médias dessas grandezas nos intervalos diurno (9:00h às 21:00h) e noturno (21:00h às 09:00h).

Através dos dados de temperatura do ar externo apresentados, constata-se que a média diurna se manteve em torno de 23°C enquanto a noturna reduziu a 19°C. Com relação à umidade relativa do ar observada, a média registrada ficou em torno de 52% para o intervalo diurno e 76% para o noturno. Nota-se ser este comportamento muito próximo àquele registrado no último mês do período anterior. Clima nestas condições permite

que a aeração seja conduzida em qualquer horário, diurno ou noturno, conforme a necessidade. A preocupação maior fica para o controle de uma possível elevação da umidade de grão.

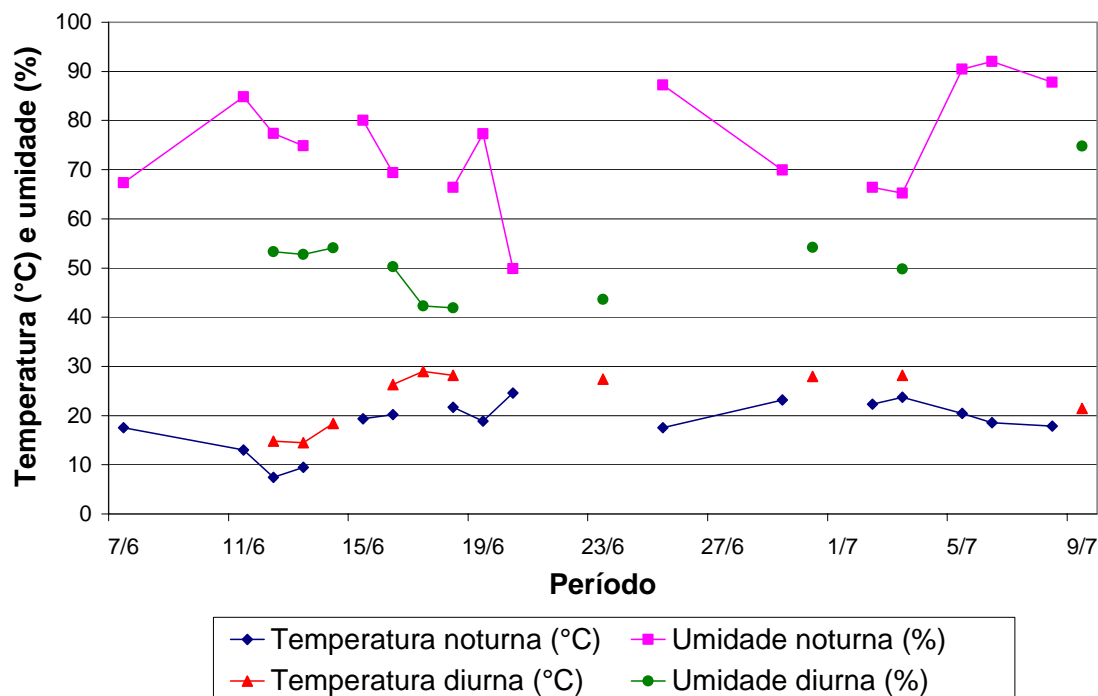


Figura 56 - Temperatura e umidade do ar externo – período de 03/06/04 a 22/07/04

As Figuras 57 e 58 apresentam o comportamento da temperatura média da massa de grãos dos silos 11 e 12 em relação à temperatura ambiente, nos horários respectivos de 9:00h e 21:00h. Observando os resultados obtidos para o grão e comparando-os com aqueles de temperatura e umidade do ar externo (Figura 56), constata-se que apesar da influência da temperatura e umidade relativa do ar externo, a temperatura da massa de grãos, para ambos os silos, manteve-se em torno de 21°C, sem grandes oscilações no silo 12 (45Hz).

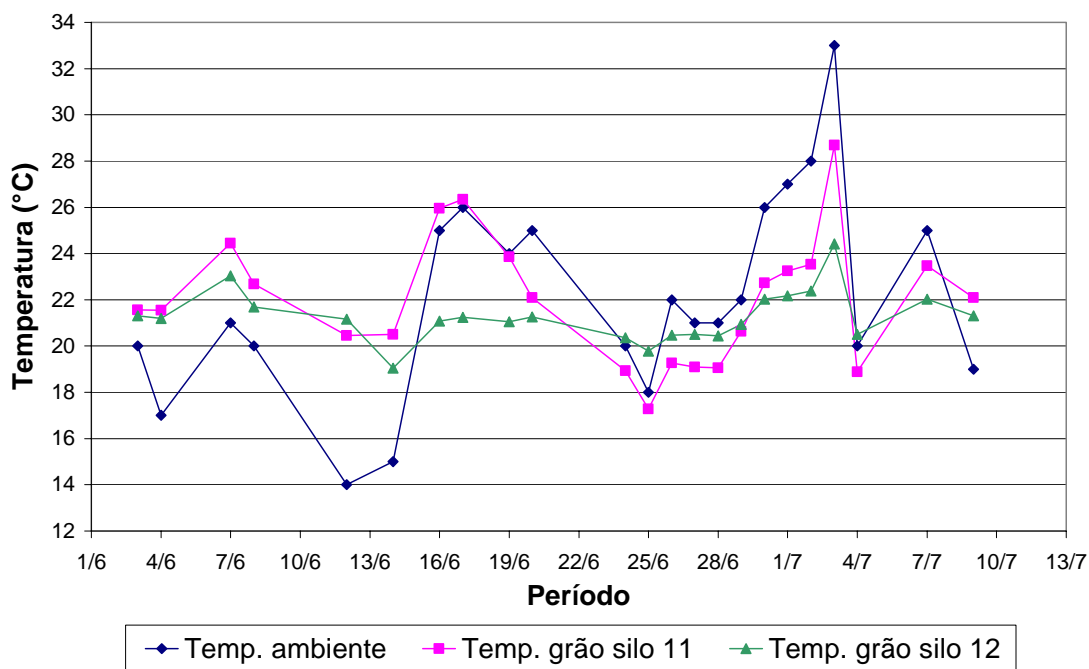


Figura 57 - Temperatura do grão e temperatura ambiente – 09:00h – 03/06/04 a 22/07/04

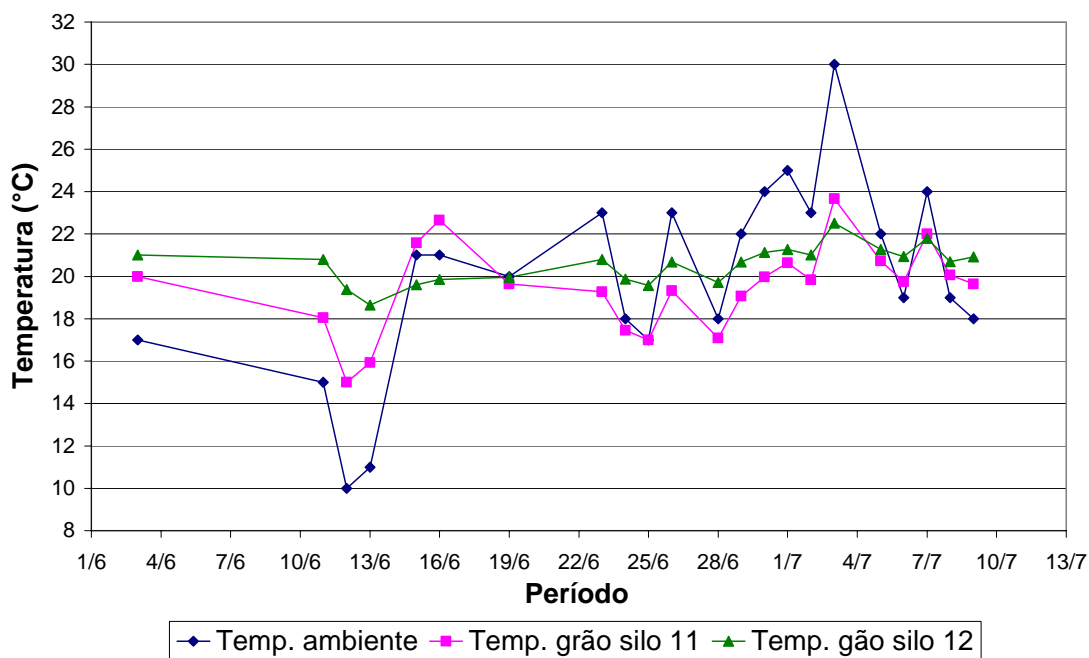


Figura 58 - Temperatura do grão e temperatura ambiente – 21:00h – 03/06/04 a 22/07/04

A Figura 59 mostra a evolução do número de horas de funcionamento dos aeradores de ambos os silos, podendo ser observado que durante o período – no intervalo de 20/06 a 01/07 - o funcionamento dos aeradores foi muito pequeno em função da elevação de umidade decorrente de chuvas. O resultado obtido referente ao tempo de aeração foi de 194,7 horas para o silo 11 e de 206,3 horas para o silo 12. Não obstante ter sido verificado maior tempo de funcionamento do aerador do silo 12, se observados os valores de potência ativa consumida, medidos simultaneamente para os dois aeradores e conforme mostram as Tabelas 14 e 15, constata-se redução da ordem de 48,62% no consumo de energia elétrica para o silo 12, ou seja, enquanto o silo 11 consumiu 3.545,49kWh, o silo 12 consumiu 1.821,63kWh.

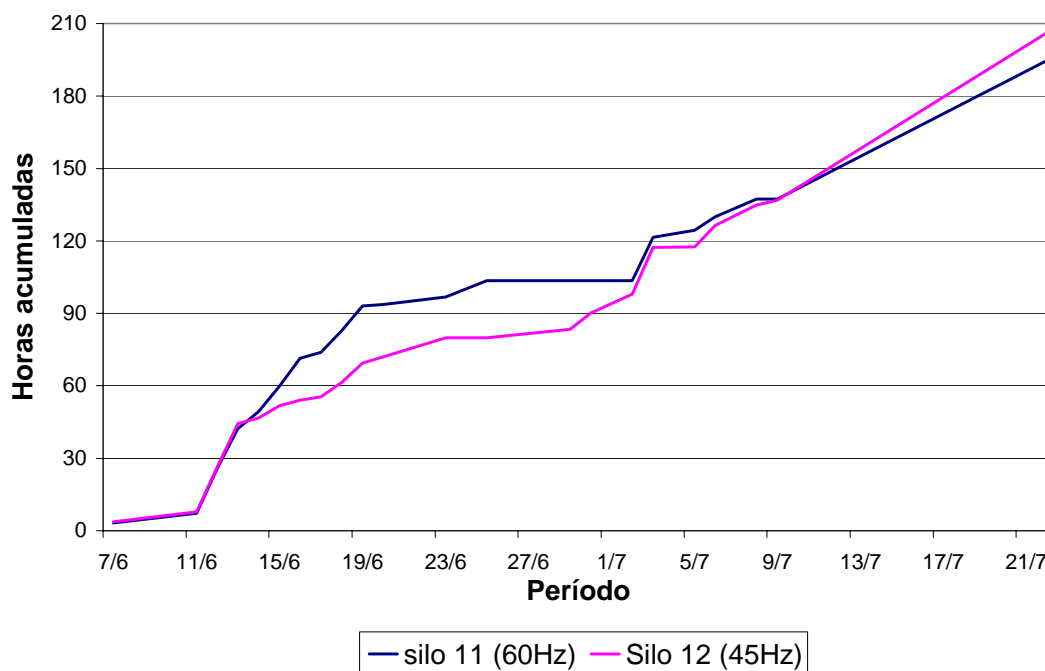


Figura 59 - Funcionamento dos aeradores dos silos 11 e 12 – 03/06/04 a 22/07/04

A Figura 60 apresenta o consumo de energia elétrica de ambos os silos no período, evidenciando a redução ocorrida para o silo 12.

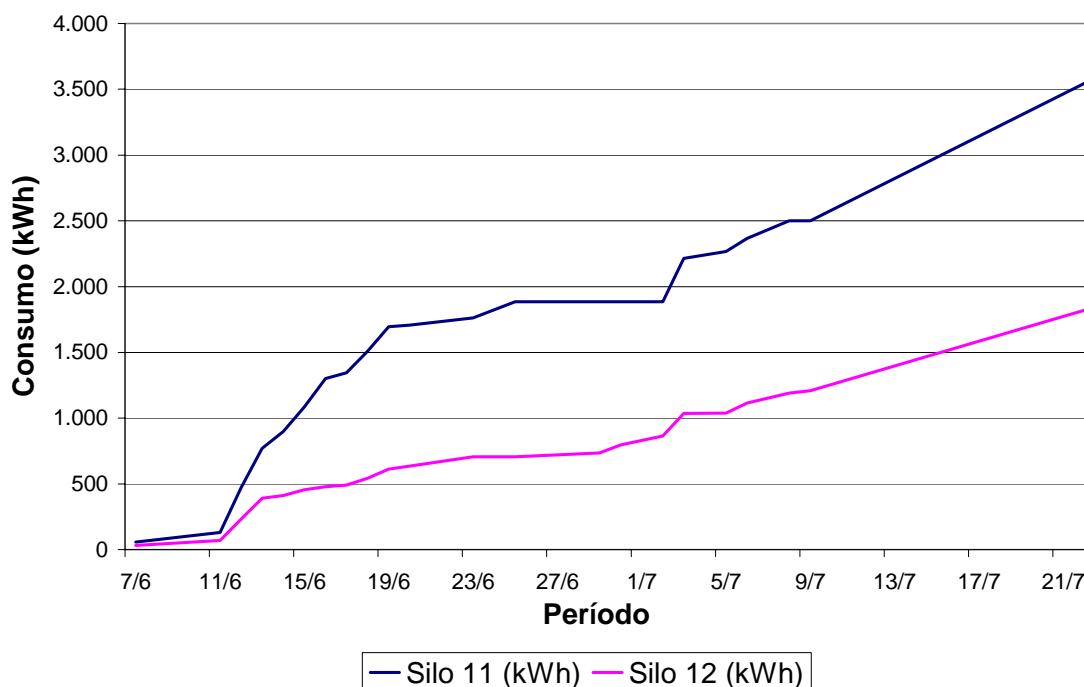


Figura 60 - Consumo de energia elétrica nos silos 11 e 12 – 03/06/04 a 22/07/04

A demonstração de que a redução de energia consumida na conservação dos grãos não comprometeu a qualidade do armazenamento pode ser observada através das Figuras 61 e 62 que mostram o comportamento da temperatura da massa de grãos, em ambos os silos, às 21:00h do dia 22/07/04. Neste momento, a temperatura ambiente registrada foi de 18°C e a média da temperatura da massa de grãos no interior do silo 11 foi de 20°C, enquanto que no silo 12 foi de 21°C, evidenciando que os grãos permanecem resfriados e que o processo de conservação se mantém eficaz, mesmo com a redução de 25% na velocidade do aerador do silo 12.

As observações efetuadas através de amostras constataram, ainda, que a umidade do grão, para ambos os silos, permaneceu em torno de 13,5% e, portanto, mantendo as mesmas características de umidade iniciais do armazenamento.

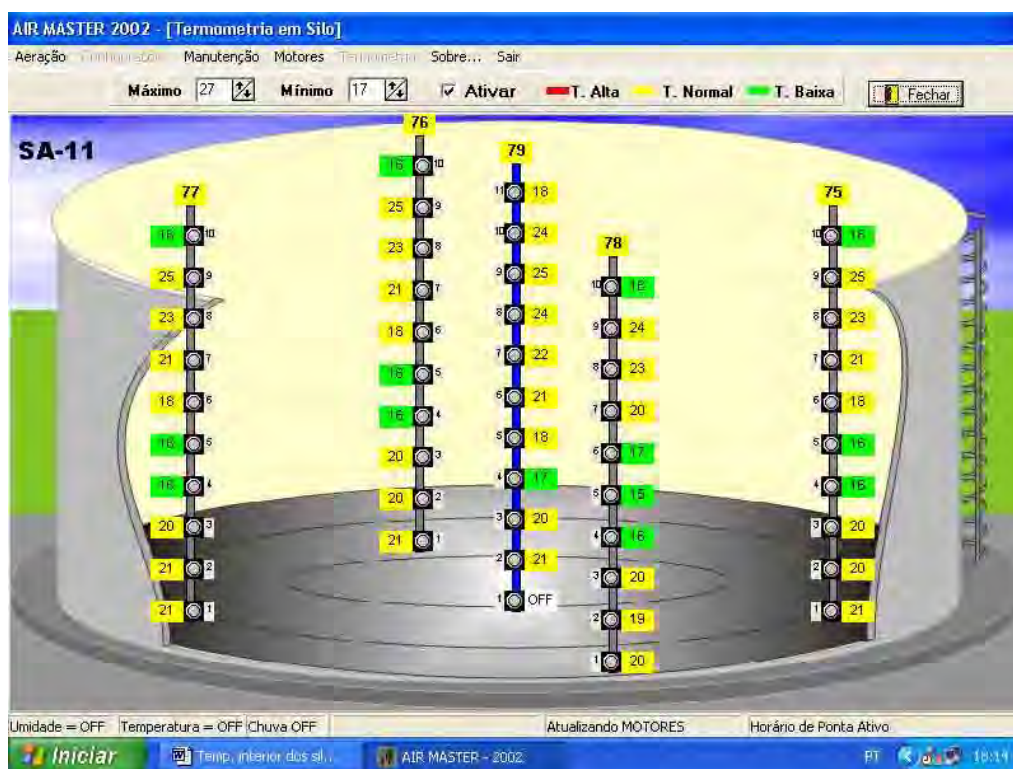


Figura 61 - Temperatura no interior do silo 11 – 22/07/04 – 21:00h

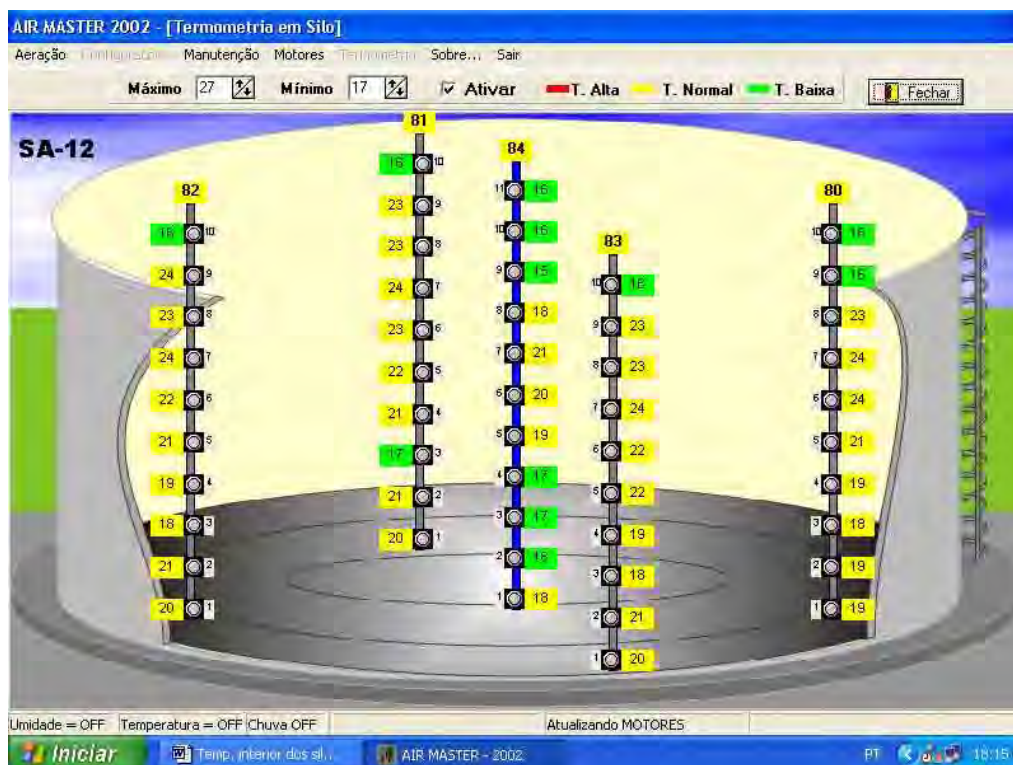


Figura 62 - Temperatura no interior do silo 12 – 22/07/04 – 21:00h

5.2.1.3 Resultados obtidos – silo 11 (60Hz) e silo 12 (40Hz) - período de 23/07/04 a 20/08/2004

O comportamento das grandezas temperatura e umidade relativa do ar externo obtido durante este período está indicado na Figura 63. A análise foi efetuada considerando as médias dessas grandezas nos intervalos diurno (9:00h às 21:00h) e noturno (21:00h às 09:00h).

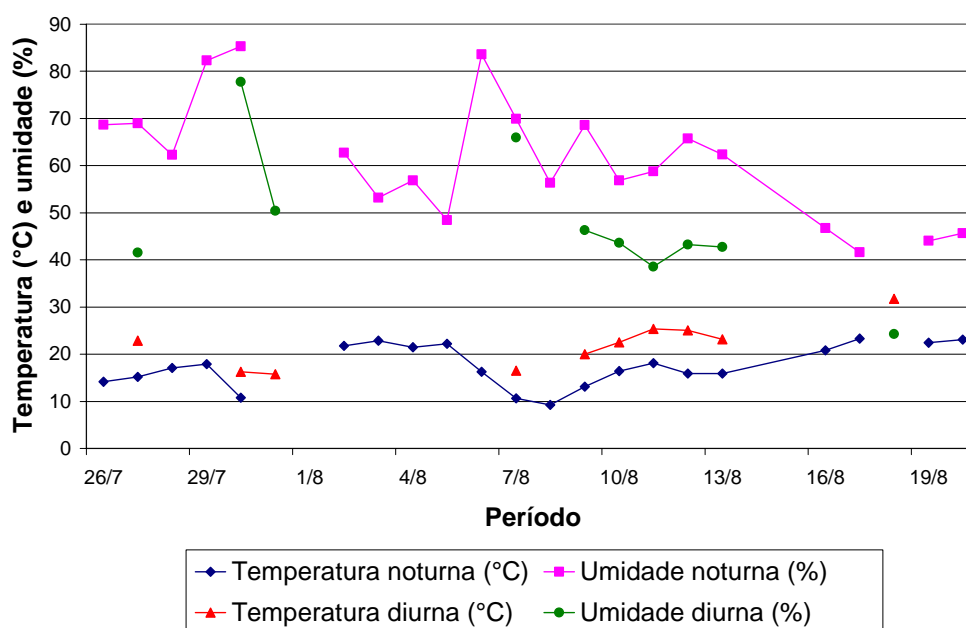


Figura 63 - Temperatura e umidade do ar externo – período de 23/07/04 a 20/08/04

Através dos dados de temperatura do ar externo apresentados, constata-se que em comparação com o período anterior, ocorreu redução na média diurna de 23°C para 21,5°C e na noturna de 19°C para 17,5°C. Em relação à umidade relativa do ar também ocorreram reduções, de 52% para 47% no intervalo diurno e de 76% para 62% no intervalo noturno, com clima propício para condução da aeração.

As Figuras 64 e 65 apresentam o comportamento da temperatura média da massa de grãos dos silos 11 e 12 em relação à temperatura ambiente, nos horários respectivos de 9:00h e 21:00h. Observando os resultados obtidos para o grão e comparando-

os com aqueles de temperatura e umidade do ar externo (Figura 63), constata-se que a temperatura da massa de grãos reduziu para aproximadamente 20°C em ambos os silos, com as maiores oscilações ainda ocorrendo no silo 11 (60Hz).

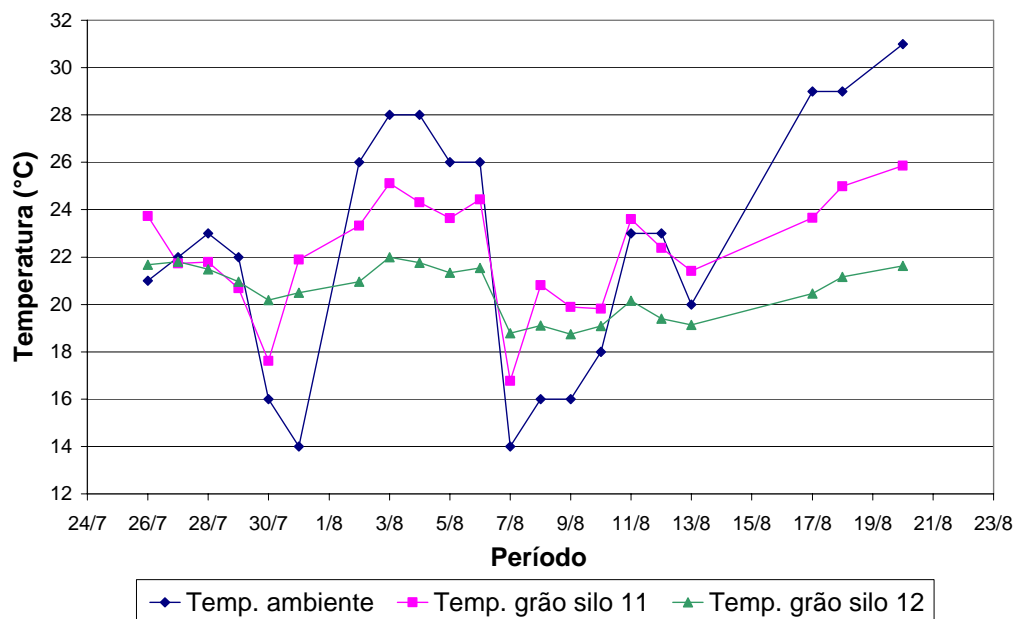


Figura 64 - Temperatura do grão e temperatura ambiente – 09:00h – 23/07/04 a 20/08/04

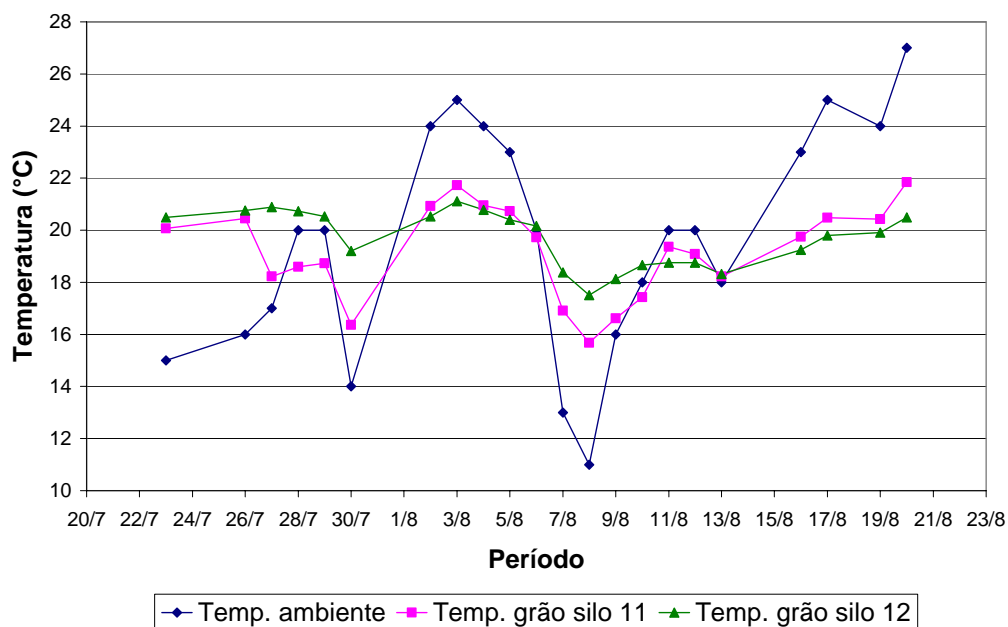


Figura 65 - Temperatura do grão e temperatura ambiente – 21:00h – 23/07/04 a 20/08/04

A Figura 66 mostra a evolução do número de horas de funcionamento dos aeradores de ambos os silos, podendo ser observado que durante o período – no intervalo de 31/07 a 05/08 - o funcionamento dos aeradores foi muito pequeno, devido, principalmente, à elevada temperatura e à baixa umidade, clima inconveniente para aeração do grão que se encontrava resfriado, dentro dos limites estabelecidos (20°C a 25°C).

O resultado obtido referente ao tempo de aeração foi de 178 horas para o silo 11 e de 157 horas para o silo 12. Esse resultado reflete o comportamento mais uniforme da temperatura do grão no silo 12 (40Hz). Para comparação do consumo de energia elétrica são observados os valores de potência ativa consumida, medidos simultaneamente para os dois aeradores, conforme mostram as tabelas 14 e 15, podendo ser constatada redução da ordem de 69,58% no consumo de energia elétrica para o silo 12, ou seja, enquanto o silo 11 consumiu 3.241,40 kWh, o silo 12 consumiu 985,96 kWh.

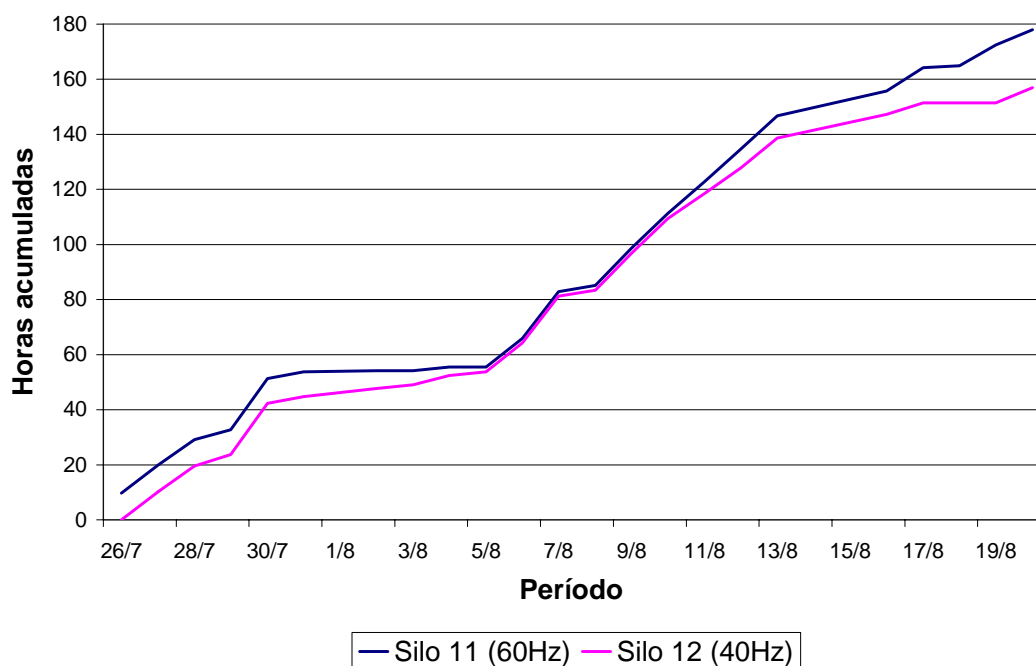


Figura 66 - Funcionamento dos aeradores dos silos 11 e 12 – 23/07/04 a 20/08/04

A Figura 67 apresenta o consumo de energia elétrica de ambos os silos no período, evidenciando a redução ocorrida para o silo 12.

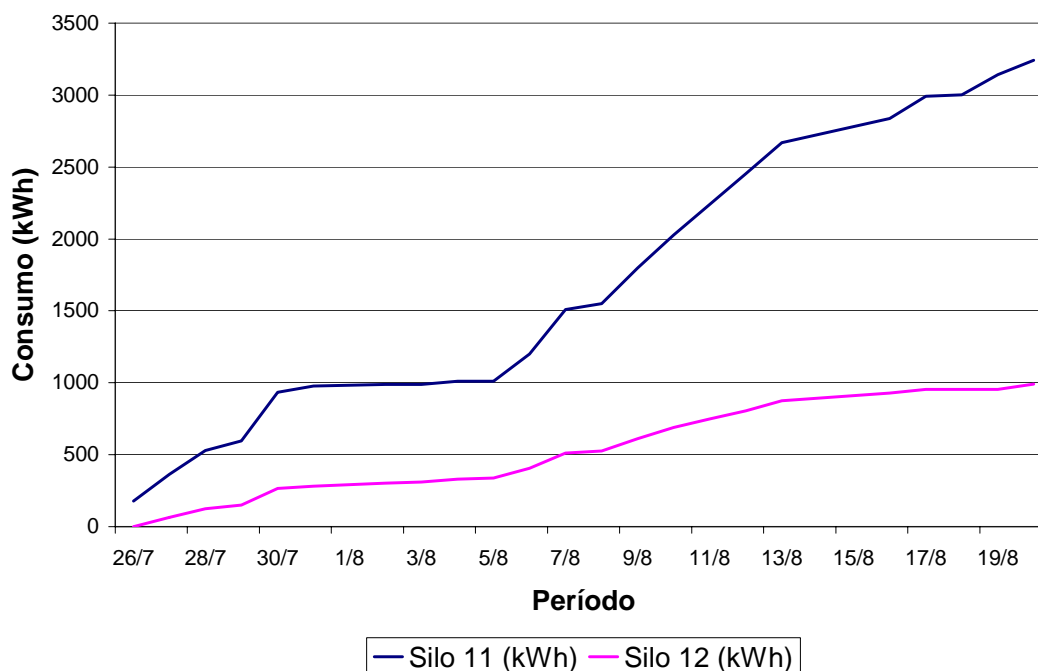


Figura 67 - Consumo de energia elétrica nos silos 11 e 12 – 23/07/04 a 20/08/04

As Figuras 68 e 69 apresentam o comportamento da temperatura da massa de grãos, em ambos os silos, às 21:00h do dia 20/08/04. A temperatura ambiente registrada neste horário foi de 27°C e a média de temperatura na massa de grãos foi de 22°C para o silo 11 e 20,7°C para o silo 12, evidenciando que os grãos permaneceram resfriados e que o processo de conservação se manteve eficaz, com média de temperatura menor para o silo 12. Aqui é importante ressaltar que o aerador do silo 12 trabalhou com redução de 33% na sua velocidade e funcionou 21 horas a menos que o aerador do silo 11.

As observações efetuadas através de amostras constataram, ainda, que a umidade do grão, para ambos os silos, permaneceu em torno de 13,5% e, portanto, dentro das características de umidade iniciais do armazenamento.

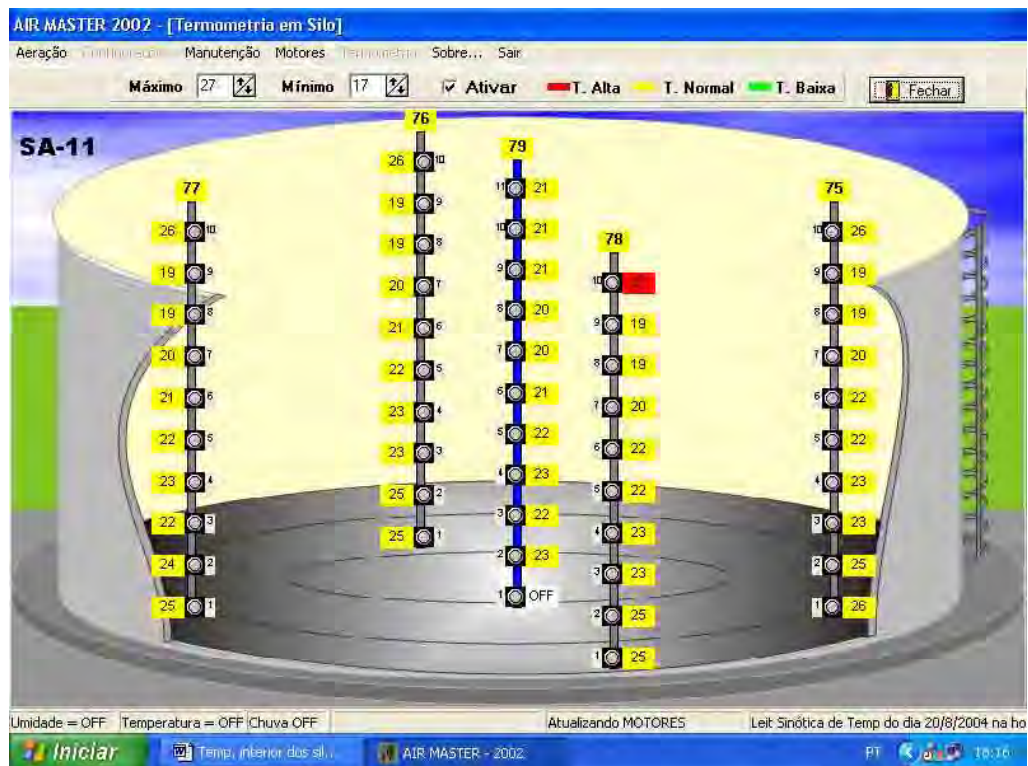


Figura 68 - Temperatura no interior do silo 11 – 20/08/04 – 21:00h

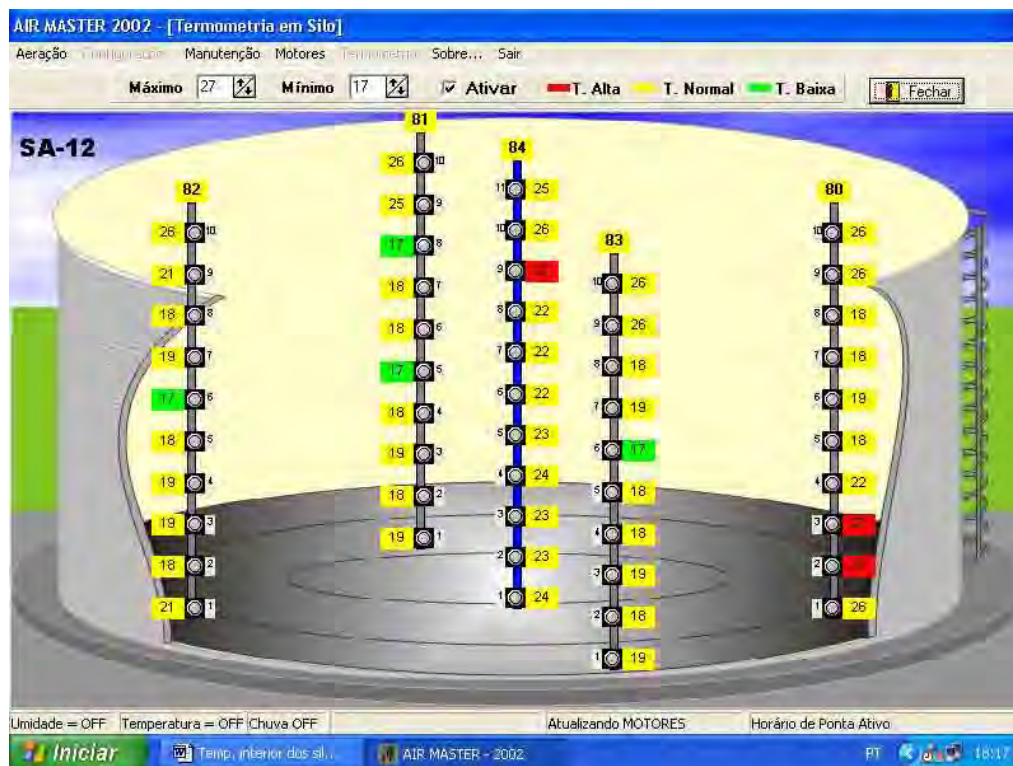


Figura 69 - Temperatura no interior do silo 12 – 20/08/04 – 21:00h

5.2.1.4 Resultados obtidos – Silo 11 (60Hz) e silo 12 (35Hz) - período de 21/08/04 a 22/10/04

O comportamento das grandezas temperatura e umidade relativa do ar externo obtido durante este período, se comparado ao período anterior, mostra uma elevação significativa da temperatura que para o intervalo diurno foi de 21,5°C para 27°C e noturno de 17,5°C para 23,5°C; e uma forte oscilação na umidade relativa do ar em alguns períodos (de 20% a 80%), mas permanecendo com média diurna praticamente igual à noturna, em torno de 55%. As médias dessas grandezas nos intervalos diurno (9:00h às 21:00h) e noturno (21:00h às 09:00h) são apresentadas na Figura 70.

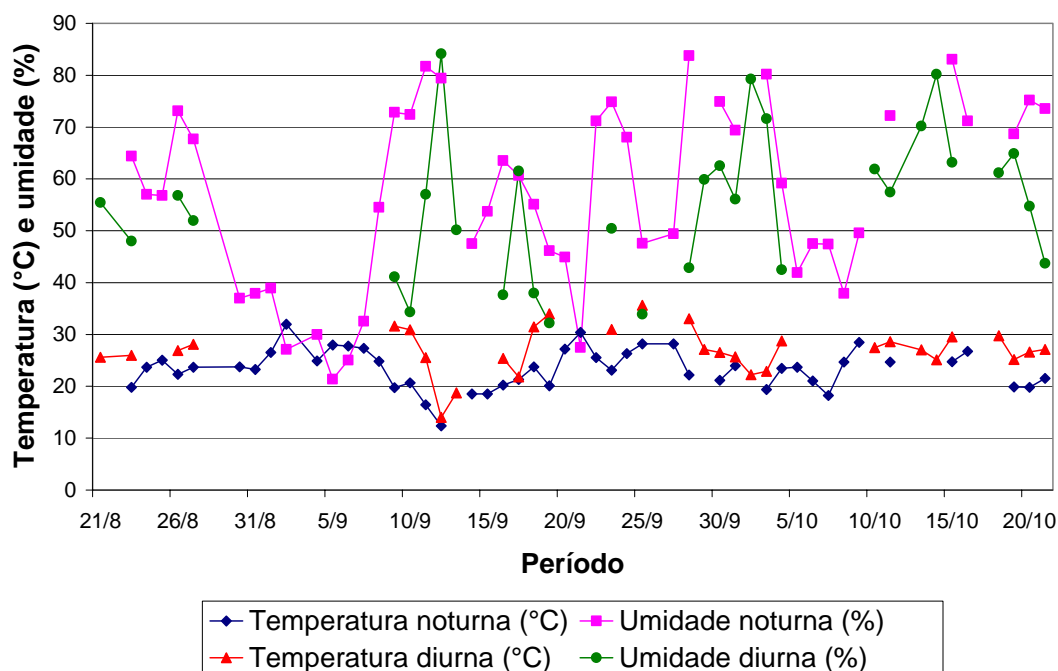


Figura 70 - Temperatura e umidade do ar externo – período de 21/08/04 a 22/10/04

Para o grão armazenado, a maior preocupação advinda do comportamento climático desse período é a elevação da temperatura da massa de grãos e a redução de umidade. Mesmo com o intervalo noturno apresentando baixa umidade, é o horário mais propício à aeração, tanto que nesse período a programação da aeração foi alterada de “conservação” para “intervalo”, sendo pré-programado o funcionamento dos aeradores para

praticamente todas a noites, sendo acionados durante o dia, em função da necessidade, através de comandos do operador.

As Figuras 71 e 72 apresentam o comportamento da temperatura média da massa de grãos dos silos 11 e 12 em relação à temperatura ambiente, nos horários respectivos de 9:00h e 21:00h.

Observando os resultados obtidos para o grão e comparando-os com aqueles de temperatura e umidade do ar externo (Figura 70), constata-se significativa oscilação na temperatura interna do silo 11, em função da maior quantidade de ar quente insuflada para seu interior. A temperatura da massa de grãos de ambos os silos durante este período apresentou média de 25°C para o silo 11 e 24°C para o silo 12, ou seja, dentro do intervalo considerado para armazenamento de grãos em regiões de clima quente.

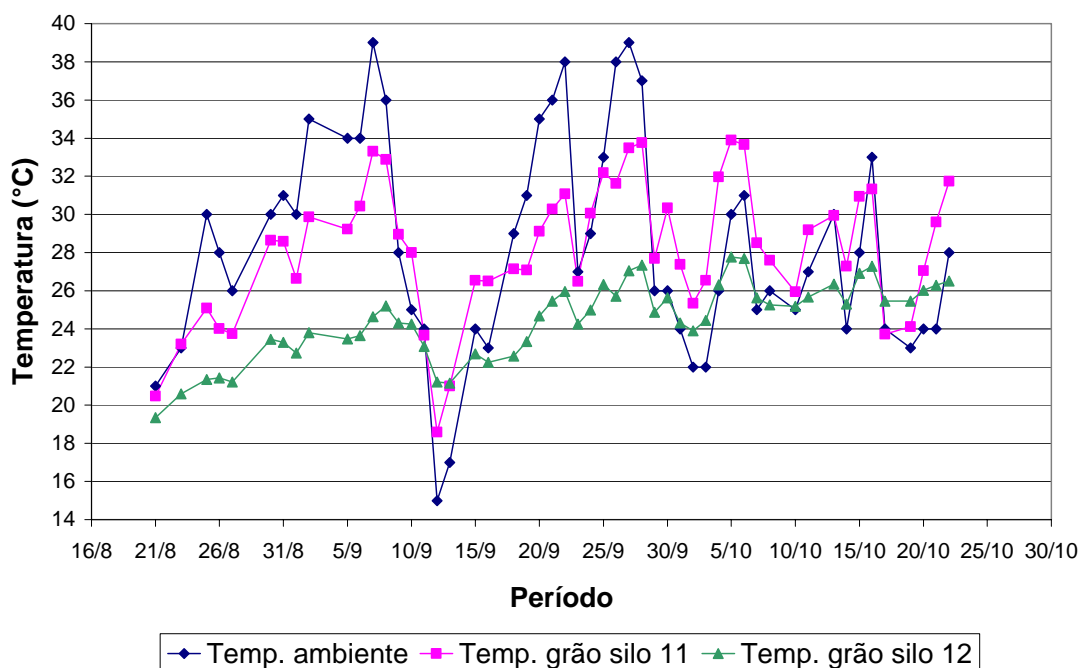


Figura 71 - Temperatura do grão e temperatura ambiente – 09:00h – 21/08/04 a 22/10/04

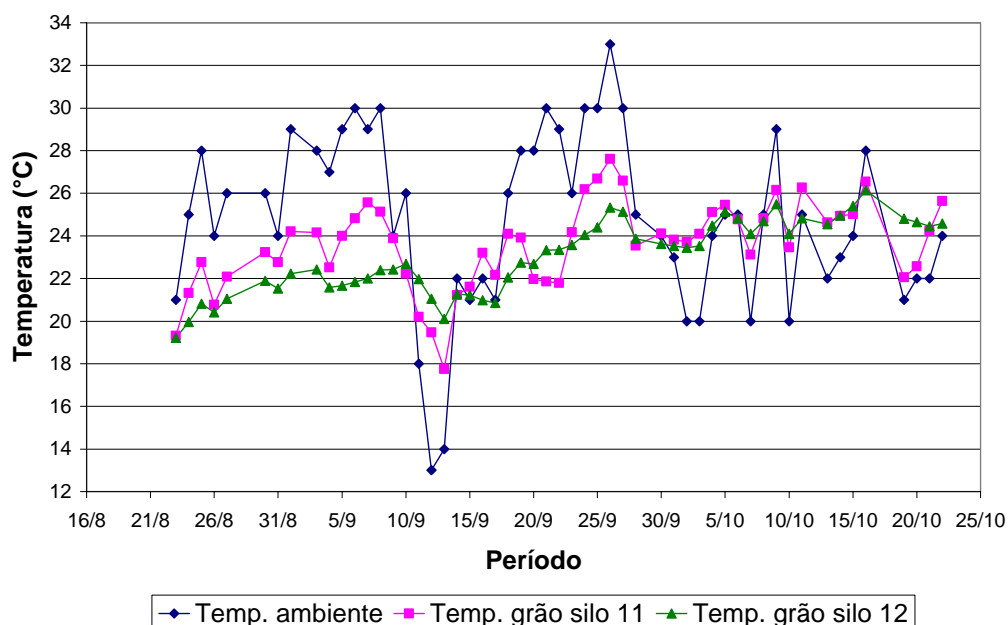


Figura 72 - Temperatura do grão e temperatura ambiente – 21:00h – 21/08/04 a 22/10/04

A Figura 73 mostra a evolução do número de horas de funcionamento dos aeradores de ambos os silos. O resultado obtido referente ao tempo de aeração foi de 521,4 horas para o silo 11 e de 535,20 horas para o silo 12.

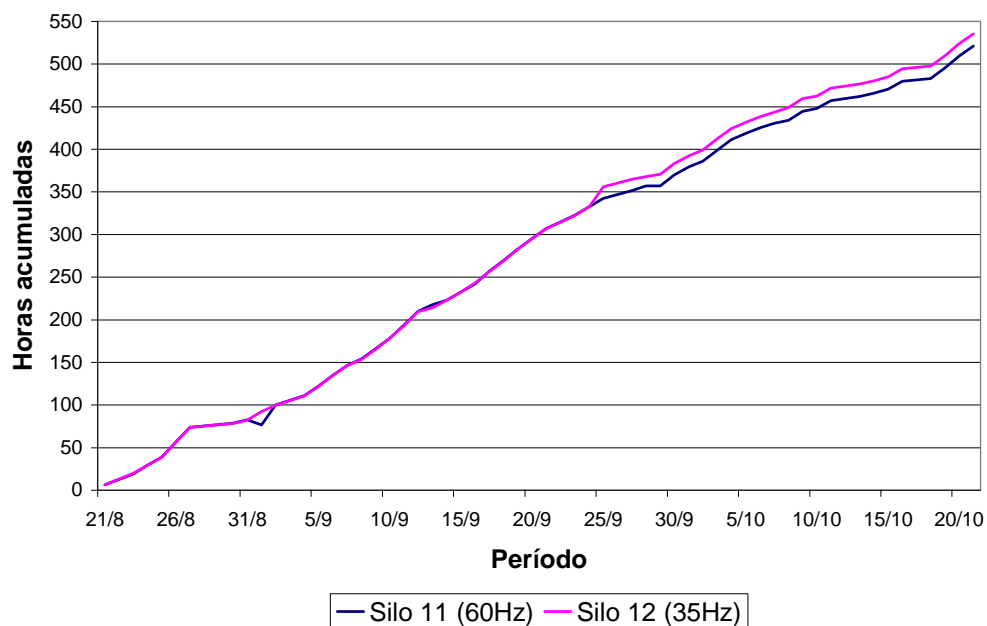


Figura 73 - Funcionamento dos aeradores dos silos 11 e 12 – 21/08/04 a 22/10/04

Não obstante ter sido verificado maior tempo de funcionamento do aerador do silo 12, se observados os valores de potência ativa consumida, medidos simultaneamente para os dois aeradores e conforme mostram as Tabelas 14 e 15, constata-se redução da ordem de 74,63% no consumo de energia elétrica para o silo 12, ou seja, enquanto o silo 11 consumiu 9.494,69kWh, o silo 12 consumiu 2.408,40kWh.

A Figura 74 apresenta o consumo de energia elétrica de ambos os silos no período, evidenciando a redução ocorrida para o silo 12.

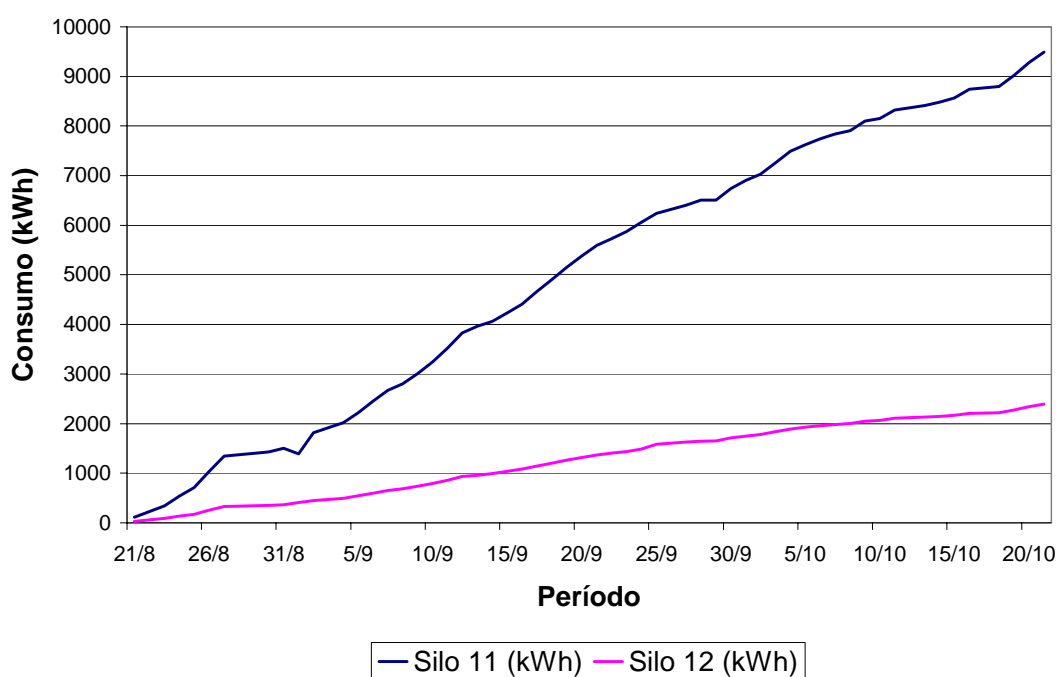


Figura 74 - Consumo de energia elétrica nos silos 11 e 12 – 21/08/04 a 22/10/04

As Figuras 75 e 76 apresentam as temperaturas da massa de grãos nos diversos pontos do interior dos silos, no dia 22/10/04 às 21:00h. A temperatura ambiente registrada nesse instante foi de 24°C, enquanto que a temperatura média da massa de grãos dos silos 11 e 12 foram 25,8°C e 24,5°C, respectivamente. A temperatura no interior de ambos os silos foi se elevando gradativamente neste período em função do aumento da temperatura ambiente e da baixa umidade relativa do ar.

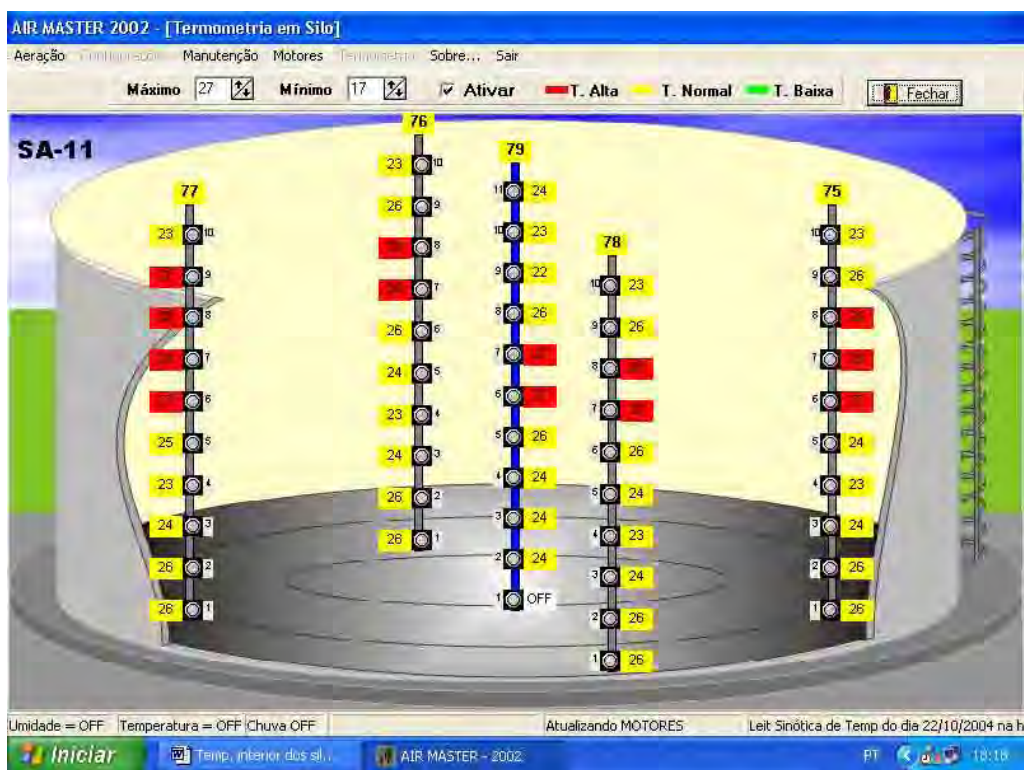


Figura 75 - Temperatura no interior do silo 11 – 22/10/04 – 21:00h

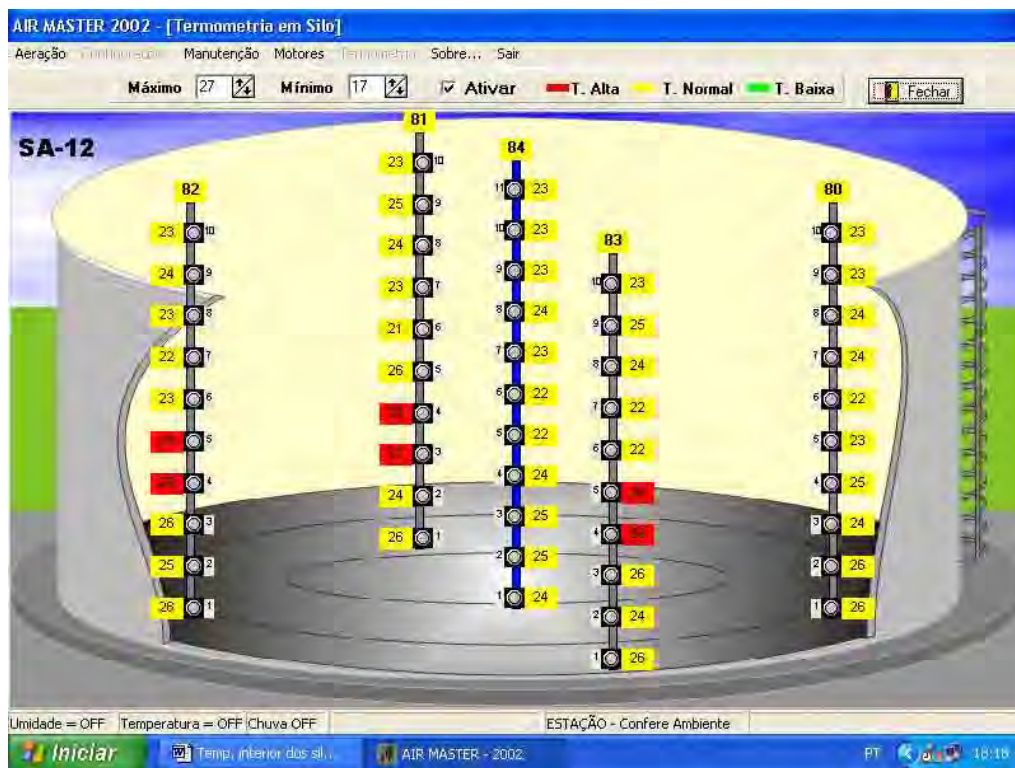


Figura 76 - Temperatura no interior do silo 12 – 22/10/04 – 21:00h

5.2.1.5 Consolidação dos Resultados Obtidos

Tabela 15 – Consolidação dos resultados obtidos no experimento – 25/03/04 a 22/10/04.

Variáveis	Período 1 (25/03 a 02/06)		Período 2 (03/06 a 22/07)		Período 3 (23/07 a 20/08)		Período 4 (21/08 a 22/10)	
	Silo 11 (60Hz)	Silo 12 (48Hz)	Silo 11 (60Hz)	Silo 12 (45Hz)	Silo 11 (60Hz)	Silo 12 (40Hz)	Silo 11 (60Hz)	Silo 12 (35Hz)
	1765rpm	1405rpm	1765rpm	1315rpm	1765rpm	1165rpm	1765rpm	1015rpm
Tempo de aeração (h)	399,5	434,4	194,7	206,3	178	157	521,4	535,20
Consumo (kWh)	7274,9	4474,32	3545,49	1821,63	3241,40	985,96	9494,69	2408,40
Redução consumo (%)	38,5		48,62		69,58		74,63	
Temperatura média do grão 09:00h (°C)	28,33	26,18	22,02	21,28	22,26	20,56	28,18	24,48
Temperatura média do grão 21:00h (°C)	23,78	24,18	19,47	20,55	19,20	19,71	23,58	23,03
Umidade do grão (%)	13,5		13,5		13,5		13	

5.3 Resultados de Simulações para Conservação de Outros Grãos

Simulando a substituição da soja por outros grãos como o milho, o arroz e o trigo, e utilizando-se dos valores referentes à pressão estática e fluxo de ar requeridos para cada tipo de grão, foram obtidas, através do *software* MAEV2000, as características de

desempenho dos aeradores para armazenagem desses grãos nas mesmas condições descritas neste experimento.

5.3.1 Resultados obtidos – simulação para milho com umidade de até 14%

A Tabela 16 apresenta as características de desempenho obtidas para o ventilador RLS-710, em simulação para aeração de milho, funcionando em 60Hz (1.765rpm), 48Hz (1.405rpm), 45Hz (1.315rpm) e 40Hz (1.165rpm), máxima redução de velocidade do aerador com resposta favorável para aeração do milho.

Tabela 16 – Desempenho do ventilador RLS-710 - simulação para aeração de milho.

Desempenho do aerador	Frequência (velocidade)			
	60Hz (1765rpm)	48Hz (1405rpm)	45Hz (1315rpm)	40Hz (1165rpm)
Vazão (m ³ /h)	31.300	24.950	23.250	20.500
Vazão específica (m ³ /min.m ³)	0,1040	0,0832	0,0775	0,0683
Pressão estática (mmca)	130,0	82,0	73,0	58,0
Pressão total (mmca)	158,5	100,1	88,7	70,2
Velocidade de descarga (m/s)	21,5	17,1	16,0	14,1
Rendimento (%)	70,4	70,5	70,7	71,0
Potência absorvida (cv)	26,06	13,14	10,79	7,5

Observa-se que a pressão estática apresentada para o milho é superior àquela apresentada para a soja em percentuais que variam de 24% a 29% e como consequência, verifica-se um aumento na eficiência do aerador. Além disso, a potência absorvida (cv) pelo aerador é praticamente constante para a mesma velocidade de funcionamento.

A eficiência energética foi verificada com base no tempo teórico para resfriamento da massa de grãos de milho (que pode ser calculado) e tempos de aeração

medidos para a soja (nos vários estágios de frequência) projetados para as condições exigidas pelo milho. Assim, foi possível estimar, com valores bastante aproximados, a eficiência energética a ser obtida na armazenagem do milho utilizando controle de velocidade do motor do aerador através do inversor de frequência.

O tempo de aeração de resfriamento calculado foi de 606,30h para 60Hz (1765rpm) e 762,24h para 48Hz (1405rpm), com redução de 36,6% no consumo de energia elétrica. Para aeração de manutenção, a frequência do inversor pode ser ajustada para 45Hz (1315rpm) e 40Hz (1165rpm), com estimativas de redução de consumo de 59% e 71,2%, respectivamente.

5.3.2 Resultados obtidos – simulação para arroz com umidade de até 14%

A Tabela 17 apresenta as características de desempenho obtidas para o ventilador RLS-710, em simulação para aeração de arroz, funcionando em 60Hz (1.765rpm), 48Hz (1.405rpm) e 45Hz (1.315rpm), máxima redução de velocidade do aerador com resposta favorável para aeração do arroz.

Tabela 17 – Desempenho do ventilador RLS-710 - simulação para aeração de arroz.

Desempenho do aerador	Frequência (velocidade)		
	60Hz (1765rpm)	48Hz (1405rpm)	45Hz (1315rpm)
Vazão (m ³ /h)	25.350	20.186	19.363
Vazão específica (m ³ /min.m ³)	0,0845	0,0673	0,0645
Pressão estática (mmca)	200,0	127,4	107,3
Pressão total (mmca)	218,7	139,2	118,2
Velocidade de descarga (m/s)	17,4	13,8	13,3
Rendimento (%)	79,3	78,4	78,8
Potência absorvida (cv)	25,88	13,04	10,75

Observa-se que a pressão estática apresentada para o arroz é quase o dobro daquela apresentada para a soja, e mesmo com o aerador funcionando na região de maior eficiência, a potência absorvida (cv) é praticamente constante para a mesma velocidade de funcionamento.

A eficiência energética foi verificada com base no tempo teórico para resfriamento da massa de grãos de arroz (que pode ser calculado) e tempos de aeração medidos para a soja (nos vários estágios de frequência) projetados para as condições exigidas pelo arroz. Assim, foi possível estimar, com valores bastante aproximados, a eficiência energética a ser obtida na armazenagem do arroz utilizando controle de velocidade do motor do aerador através do inversor de frequência.

Atendendo à condição de vazão específica recomendada para a aeração ($0,08\text{m}^3/\text{min.m}^3$), conforme Tabela 3, o tempo de aeração de resfriamento calculado foi de 603,69h para 60Hz (1765rpm). Para o arroz, a redução no consumo de energia elétrica deverá ser verificada apenas quando da aeração de manutenção, com a frequência do inversor podendo ser ajustada para 48Hz (1405rpm) e 45Hz (1315rpm), com estimativas de redução de consumo de 48% e 57%, respectivamente.

5.3.3 Resultados obtidos – simulação para trigo com umidade de até 14%

A Tabela 18 apresenta as características de desempenho obtidas para o ventilador RLS-710, em simulação para aeração de trigo, funcionando em 60Hz (1.765rpm) e 50Hz (1.465rpm), máxima redução de velocidade do aerador com resposta favorável para aeração do trigo.

O sistema de aeração do experimento foi dimensionado para atender ao trigo e, para tanto, seria esperado que a maior eficiência apresentada pelo aerador fosse verificada nessa condição de armazenamento, sendo o ocorrido.

Constata-se, mais uma vez, a constância da potência absorvida pelo sistema de aeração para a mesma velocidade de rotação, característica desse tipo de ventilador.

Tabela 18 – Desempenho do ventilador RLS-710 - simulação para aeração de trigo.

Desempenho do aerador	Frequência (velocidade)	
	60Hz (1765rpm)	50Hz (1465rpm)
Vazão (m ³ /h)	22.950	19.020
Vazão específica (m ³ /min.m ³)	0,0765	0,0634
Pressão estática (mmca)	222,3	153,1
Pressão total (mmca)	237,6	163,7
Velocidade de descarga (m/s)	15,7	13,5
Rendimento (%)	80,2	80,0
Potência absorvida (cv)	25,12	14,36

Com relação à eficiência energética, esta poderá ser obtida após o resfriamento da massa de grãos, na aeração de manutenção, onde a frequência do inversor poderá ser ajustada para 50Hz (1465rpm), sendo a estimativa de redução no consumo para essa fase de aeração de aproximadamente 42,8%.

5.3.4 Consolidação dos Resultados de Simulações para Outros Grãos

Tabela 19 – Consolidação dos resultados de simulações efetuadas para milho.

Variáveis	Resfriamento		Manutenção			
	60Hz (1765rpm)	48Hz (1405rpm)	60Hz (1765rpm)	45Hz (1315rpm)	60Hz (1765rpm)	40Hz (1165rpm)
Tempo de aeração (h)	606,30	762,24	1	1	1	1
Consumo (kWh)	11.629	7.372	19,18	7,94	19,18	5,52
Redução de consumo (%)	36,6		59		71,2	

Tabela 20 – Consolidação dos resultados de simulações efetuadas para arroz.

Variáveis	Resfriamento		Manutenção		
	60Hz (1765rpm)	60Hz (1765rpm)	48Hz (1405rpm)	60Hz (1765rpm)	45Hz (1315rpm)
Tempo de aeração (h)	603,69	1	1	1	1
Consumo (kWh)	11.499	18,46	9,6	18,46	7,9
Redução consumo (%)	-	48		57	

Tabela 21 – Consolidação dos resultados de simulações efetuadas para trigo.

Variáveis	Resfriamento		Manutenção
	60Hz (1765rpm)	60Hz (1765rpm)	50Hz (1465rpm)
Tempo de aeração (h)	1.035,18	1	1
Consumo (kWh)	19.139	18,49	10,57
Redução consumo (%)	-	42,8	

6 CONCLUSÃO

Em decorrência das diferentes demandas exigidas pelo processo de armazenagem de grãos – demandas essas resultantes de variáveis tais como fatores climáticos, tipo e quantidade de grão armazenado, finalidade da aeração, tempo de armazenagem, entre outras – e levando-se em conta que os motores mais utilizados nos sistemas de aeração de grãos são os de indução, funcionando com velocidade fixa, o dimensionamento desses sistemas, via de regra, é efetuado de acordo com a pior situação de carga a ser atendida. Assim, uma forma de intervenção, com vistas a melhorar a eficiência energética desses sistemas, consideraria a possibilidade de flexibilizar o funcionamento dos motores de indução dos aeradores através do controle de velocidade possibilitado pelo inversor de frequência, sendo esta a proposta levada a termo por este trabalho.

Os silos utilizados neste experimento e que no momento armazenavam soja, foram construídos para armazenamento de milho, arroz e trigo, além da soja, de forma que seus sistemas de aeração foram dimensionados para atender às condições exigidas pelo trigo, produto que oferece a maior resistência à passagem de ar e, portanto, exige maior potência dos aeradores.

A implementação de controle de velocidade do motor de um dos aeradores possibilitou que este funcionasse com velocidade variável e, portanto, controlada, permitindo que medições fossem realizadas e comparadas nas várias etapas do experimento.

Um primeiro aspecto verificado por este trabalho refere-se à aeração com finalidade de resfriamento. O tempo de resfriamento da massa de grãos é teórico pois depende das propriedades físicas dos grãos e dos fatores climáticos, impossíveis de serem controlados. Ainda assim, é imprescindível que se dê dentro de certos limites, de tal forma a não comprometer a qualidade dos grãos, mais suscetíveis em temperaturas elevadas, principalmente quando o armazenamento ocorrer em regiões de clima quente como é o caso neste experimento. O tempo de resfriamento estimado para a soja foi de 486,06 horas para funcionamento do aerador em 60Hz (1.765rpm), 625,12 horas para funcionamento em 48Hz (1.405rpm) e 657,59 horas para funcionamento em 45Hz (1.315rpm). Entretanto, de acordo com as medições efetuadas durante o período em que o inversor esteve ajustado para 48Hz (1.405rpm), o percentual de economia de energia elétrica foi de 38,5%, chegando a 48,62% quando ajustado para 45Hz (1.315rpm). Isso demonstra que mesmo necessitando de maior tempo de funcionamento para atingir a vazão de ar necessária ao processo de resfriamento, a redução na frequência/rotação do motor possibilita economia significativa de energia elétrica.

Tomando como base as medições efetuadas para a soja e projetando esses resultados para as condições exigidas pelo milho, o tempo de aeração para resfriamento, nas condições do experimento, seria de 606,3 horas em 60Hz (1.765rpm) e 762,34 horas em 48Hz (1.405rpm), com percentual de economia em torno de 36,6% para essa última frequência, não sendo seguro resfriar tal grão com frequências/rotações menores quando o armazenamento ocorrer em regiões de clima quente. Ainda utilizando-se da projeção para arroz e trigo, produtos que oferecem maior resistência à passagem de ar, a aeração recomendada deveria ser efetuada em 60Hz (1.765rpm), com tempo de resfriamento previsto para 603,69 horas e 1.035,18 horas, respectivamente. Assim, para esses dois produtos não haveria previsão de economia de energia elétrica no processo de resfriamento, uma vez que pequena redução no consumo não justificaria o risco de comprometer a qualidade dos grãos.

Um segundo aspecto verificado pelo experimento refere-se à aeração de manutenção, cuja finalidade é conservar os grãos já resfriados. Uma vez observado que a massa de grãos encontra-se resfriada, com temperatura uniforme, apresentando pequenas

oscilações em função da temperatura e umidade do ar externo, o experimento constatou que a vazão específica de ar pode ser reduzida para níveis necessários apenas para neutralizar o aquecimento espontâneo e as correntes de convecção que se formam devido à variações da temperatura e umidade externas. É nesta fase que ao se utilizar o controle de velocidade dos aeradores com inversor de frequência, são obtidos os percentuais de economia de energia elétrica mais expressivos. Para o caso da soja, durante o período do experimento em que o inversor esteve ajustado em 40Hz (1.165rpm), a redução no consumo de energia elétrica chegou a 69,58%. Em 35Hz (1.015rpm) - máxima redução de velocidade cuja resposta para aeração de manutenção se mostrou favorável – a redução no consumo obtida foi de 74,63%. Projetando esses resultados para outros grãos armazenados nas mesmas condições, os cálculos demonstraram que a máxima redução indicada para o milho seria de 40Hz (1.165rpm), para o arroz 45Hz (1.315rpm) e para o trigo 50Hz (1.465rpm), com estimativas de redução no consumo em torno de 71% para o milho, 57% para o arroz e 42% para o trigo. Assim, considerando a aeração com finalidade de manutenção, a redução no consumo de energia elétrica se aplicou a todos os produtos para os quais o sistema foi dimensionado, inclusive o trigo. Isso se explica pelo fato de que a vazão específica do fluxo de ar utilizada para o dimensionamento do sistema de aeração ter sido aquela recomendada para o período inicial de resfriamento e, portanto, maior que a necessária para o período de manutenção.

Um terceiro aspecto constatado no decorrer do experimento foi o comportamento da temperatura da massa de grãos em relação à temperatura ambiente, ficando evidenciadas menores oscilações e maior uniformidade na temperatura dos grãos aerados com vazões menores.

Entre os benefícios advindos do processo de controle de velocidade dos motores dos aeradores, demonstrados pelo experimento, estão a elevação do fator de potência da instalação em função da redução da potência reativa e conseqüente liberação de carga dos transformadores; a diminuição de custos com energia elétrica em função da redução de consumo, demanda e elevação de fator de potência; e as partidas e paradas suaves possibilitadas ao sistema de aeração.

Finalmente, os resultados obtidos neste experimento contribuem com parâmetros reais e adequados ao desenvolvimento e incremento de *softwares* de gerenciamento para controle automático de aeração, viabilizando, através de uma relação

custo/benefício em níveis mais aceitáveis, a implementação de controle de velocidade nos sistemas de aeração de silos de armazenagem de grãos, utilizando inversores de frequência.

Como forma de dar continuidade ao este trabalho, destacam-se possíveis complementações:

- desenvolvimento de sensores de umidade de grãos;
- estudos sobre a compatibilidade eletromagnética em silos metálicos;
- estudos sobre a interferência de harmônicas no sistema elétrico.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução ANEEL nº 456**, de 29 de novembro de 2000. Estabelece as condições gerais de fornecimento de energia elétrica. Brasília, DF., 2002. Disponível em: <<http://www.aneel.gov.br>>. Acesso em: 03 de nov. 2004.

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

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

COTRIM, Ademaro A. M. B. **Instalações Elétricas**. São Paulo, SP: Makron Books, 2003. p. 203-206.

CRUZ, L. F. **Modelo Fuzzy para obtenção do tempo de aeração em silos verticais visando reduzir o consumo de energia elétrica**. Botucatu, 2001. 102p. Tese (Doutorado em

Agronomia/Energia na Agricultura). Faculdade de Ciências Agronômicas. Universidade Estadual Paulista.

DE BEER, A. G. **Drying and storing agricultural products on farm.** Farming in South Africa. [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).

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 Agronômicas. Universidade Estadual Paulista.

KEPLER WEBER INDÚSTRIA S.A. **Silos.** Disponível em: <<http://www.kepler.com.br>>. Acesso em: 3 nov. 2004.

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

LOPES, R.P.; AFONSO, A. D. L.; SILVA, J. de S. **Energia no pré-processamento de produtos agrícolas.** In: SILVA, J. de S. e (Ed.), Secagem e armazenamento de produtos agrícolas. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000. P 191-217.

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

OTAM VENTILADORES INDUSTRIAIS LTDA. **Produtos.** Disponível em: <<http://www.otam.com.br/port/home.html>>. Acesso em: 3 nov. 2004.

PEREIRA, J.A. M. **Água no Grão**. Viçosa: CENTREINAR, 1988. (Apostila).

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

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

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

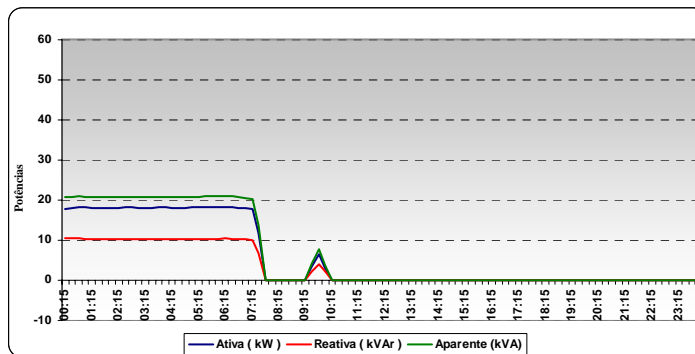
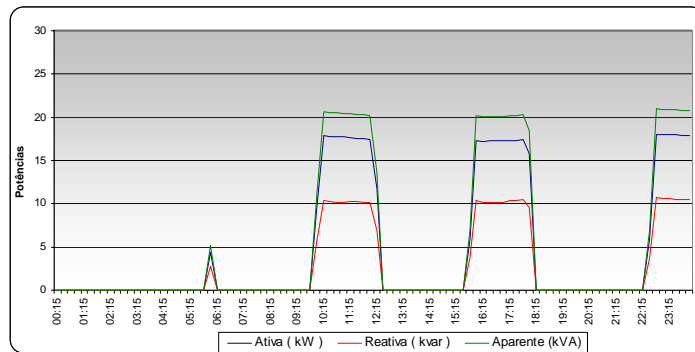
SILVA, J. S. **Pré-processamento de produtos agrícolas**. Juiz de Fora: Instituto Maria, 1995, 500p.

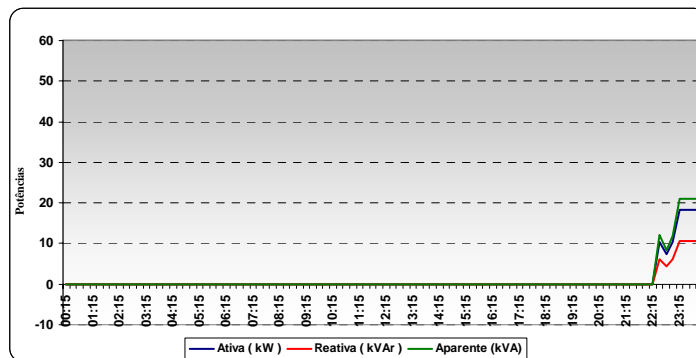
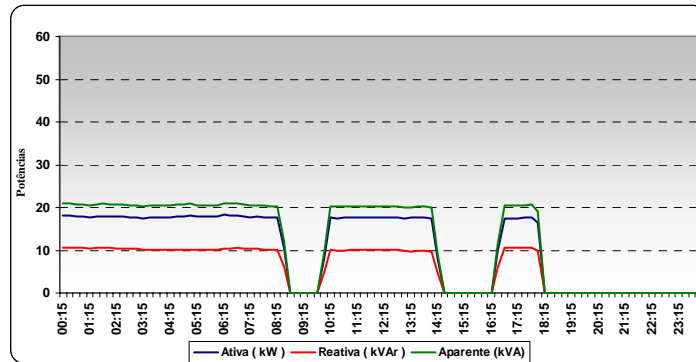
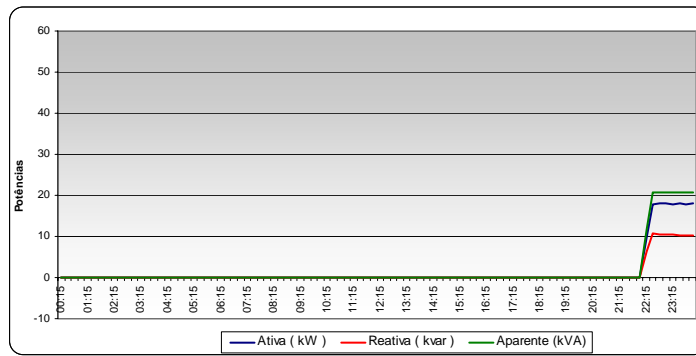
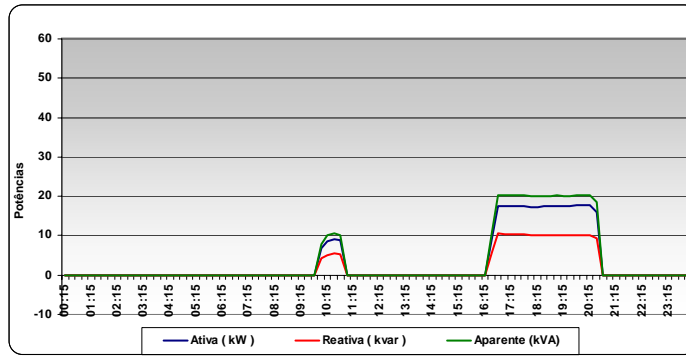
SILVA, J. S. **Secagem e Armazenagem de Produtos Agrícolas**. Viçosa: Aprenda Fácil, 2000.

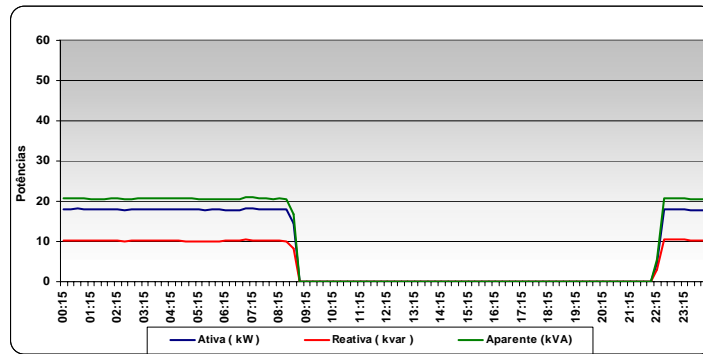
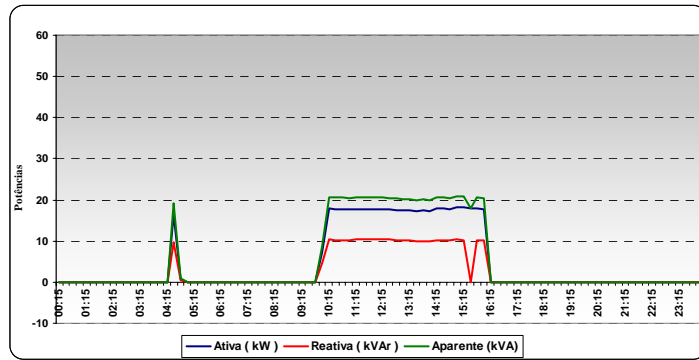
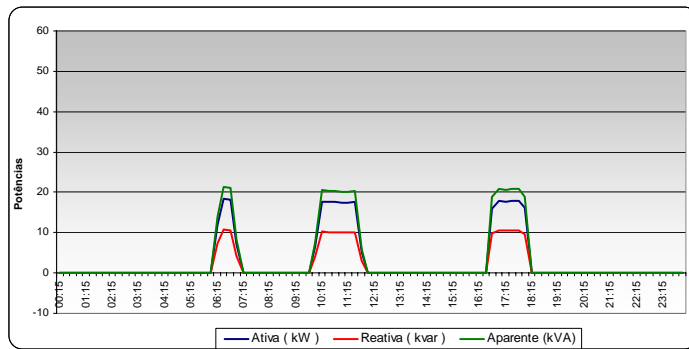
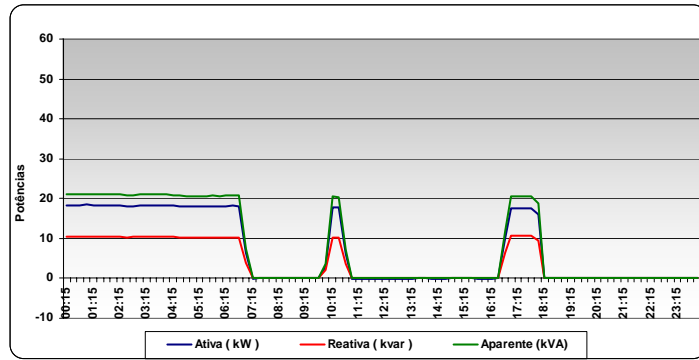
WEBER, E. **Armazenagem agrícola**. Guaíba: Agropecuária, 2001. 396p.

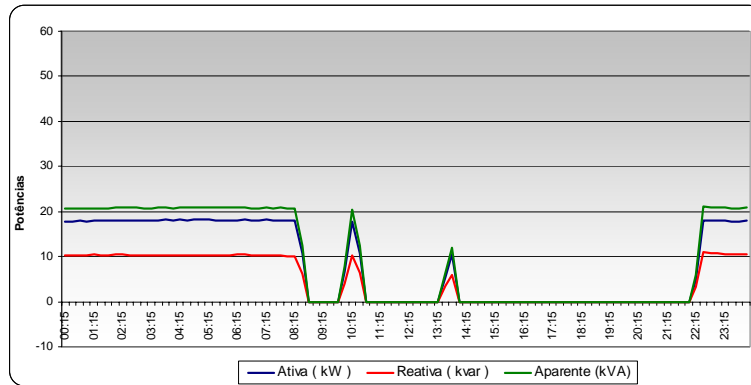
8 APÊNDICES

8.1 Curvas de Carga – 60Hz (1765rpm)

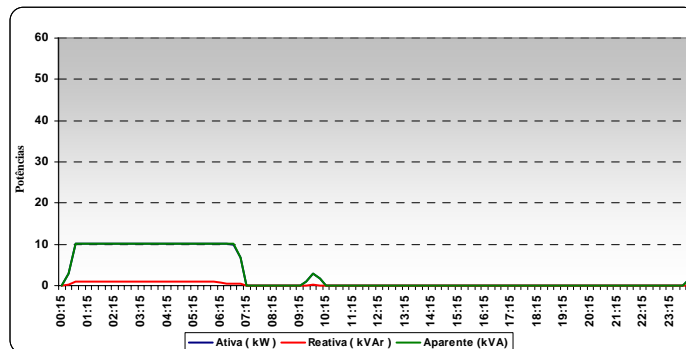
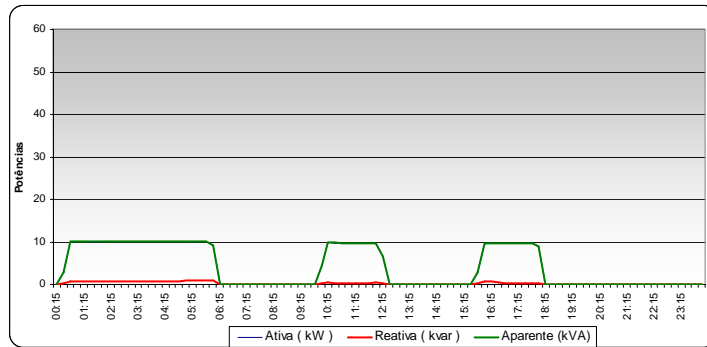


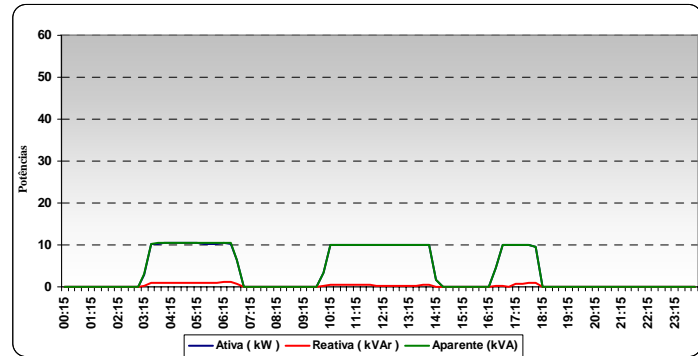
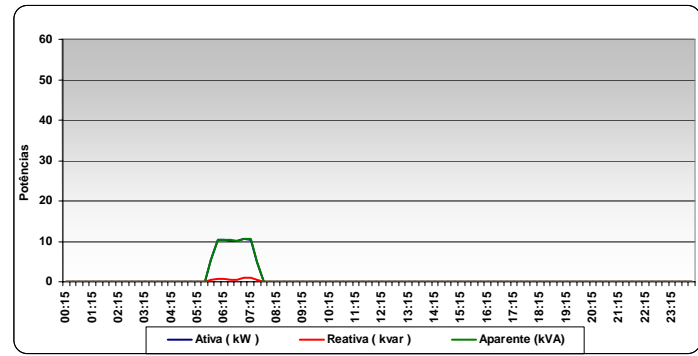
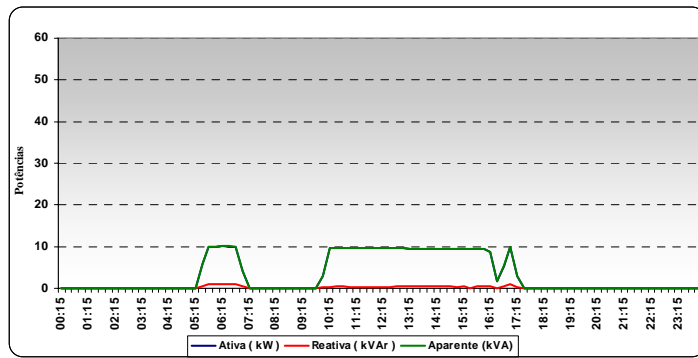
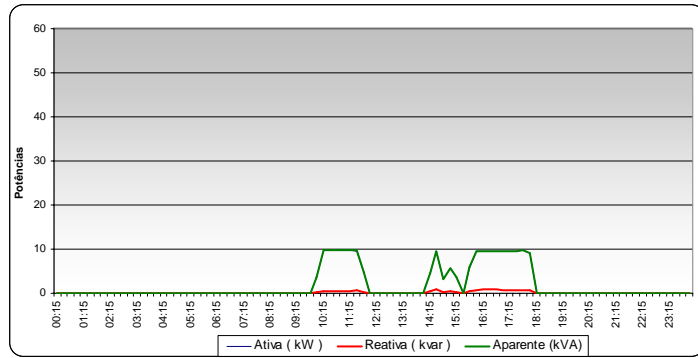


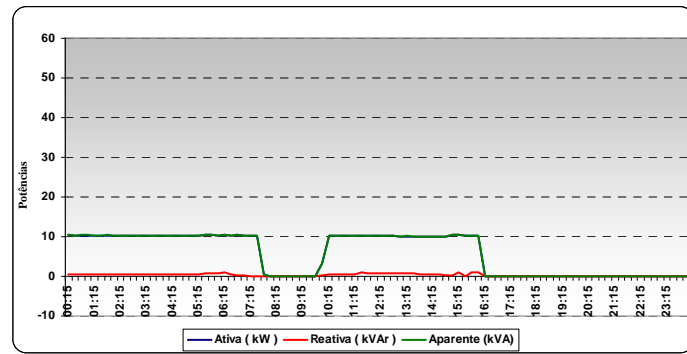
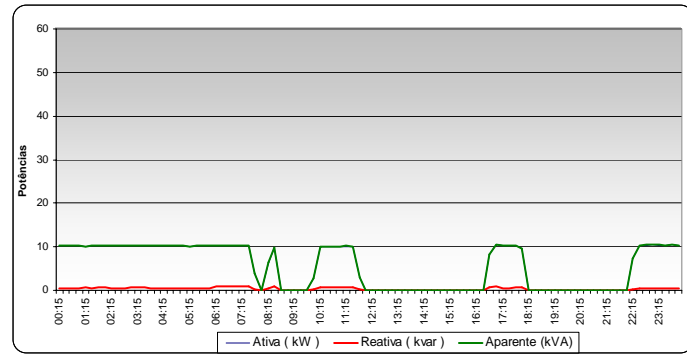
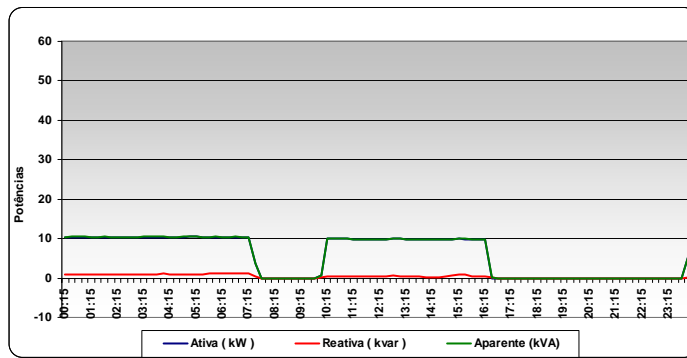
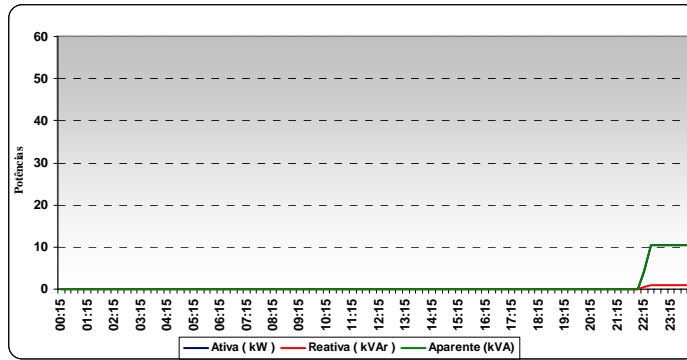




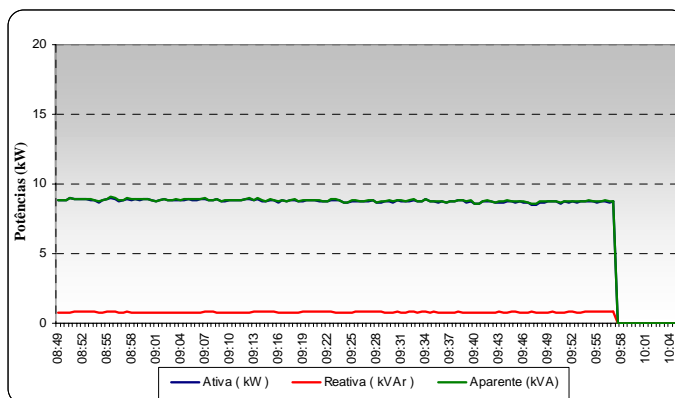
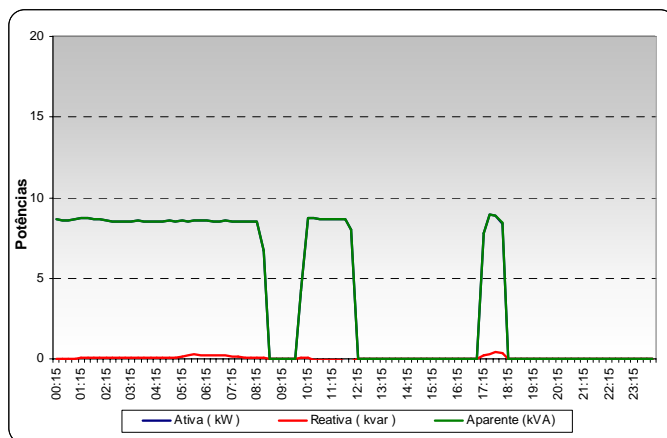
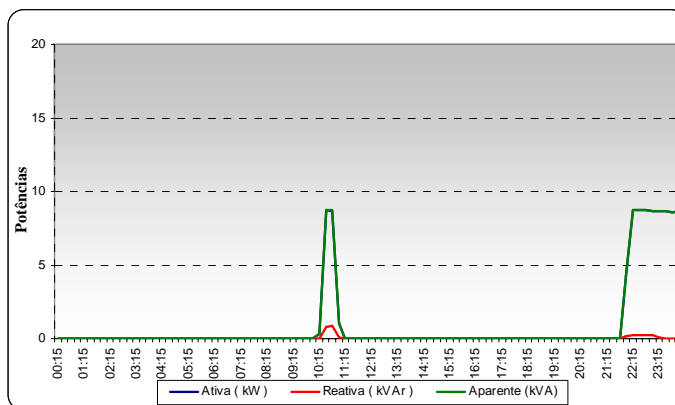
8.2 Curvas de Carga – 48Hz (1405rpm)



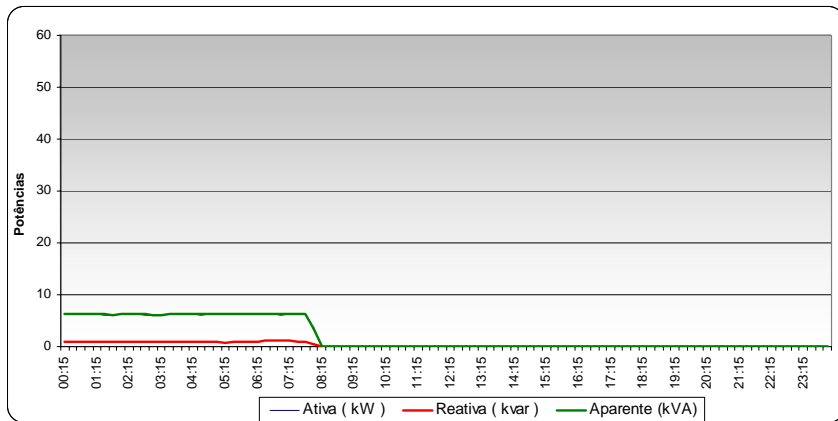
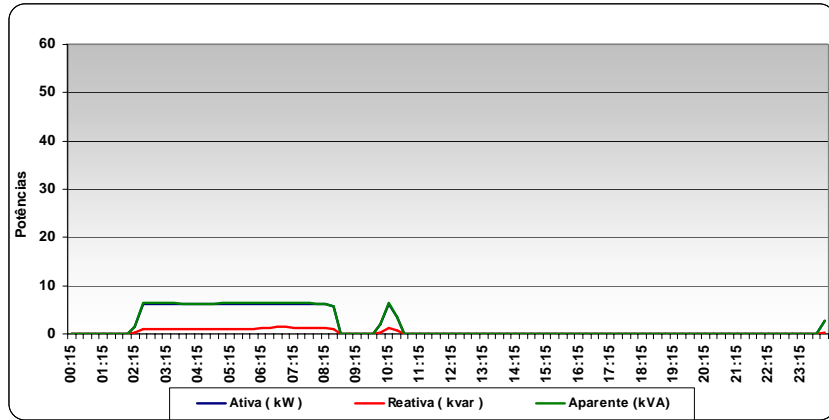




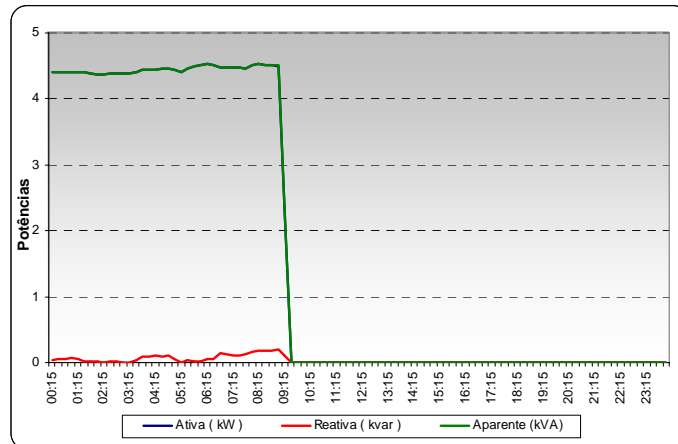
8.3 Curvas de Carga – 45Hz (1315rpm)

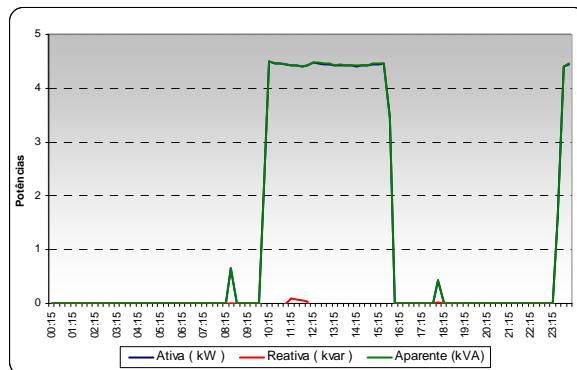
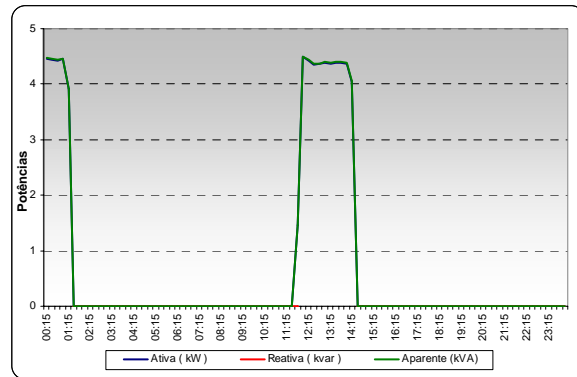
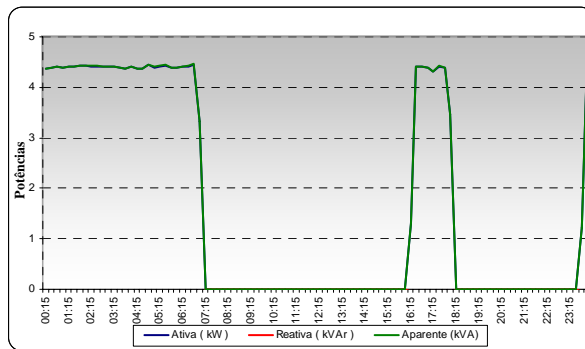
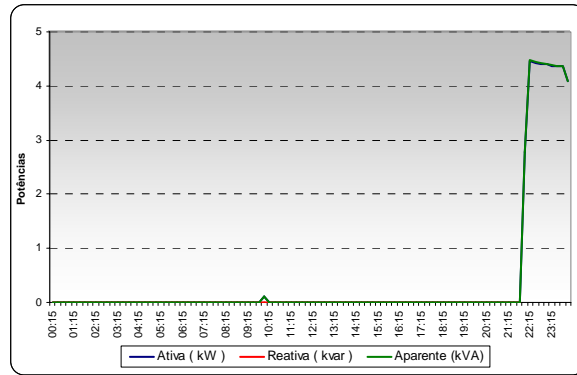


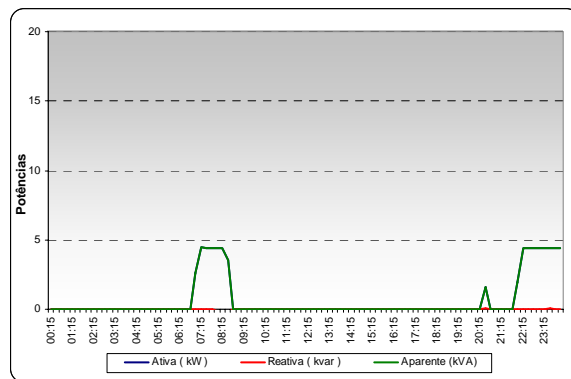
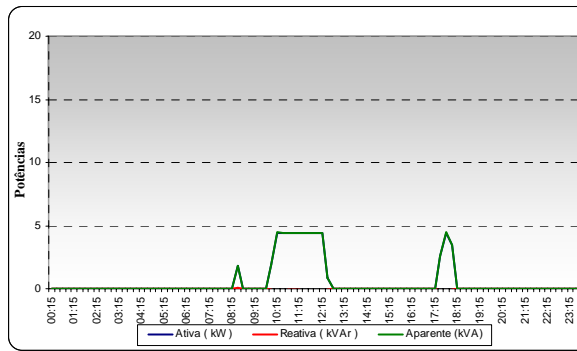
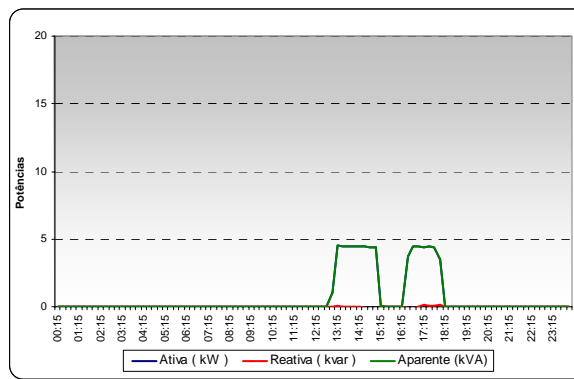
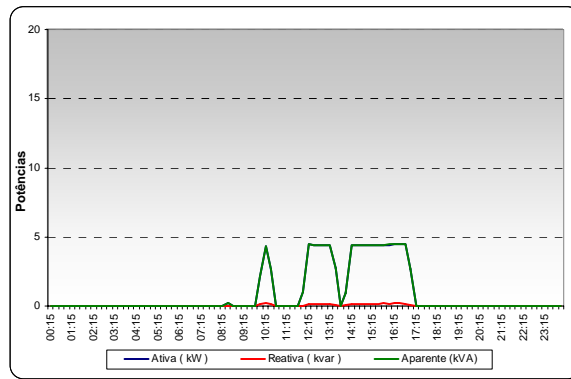
8.4 Curvas de Carga – 40Hz (1165rpm)

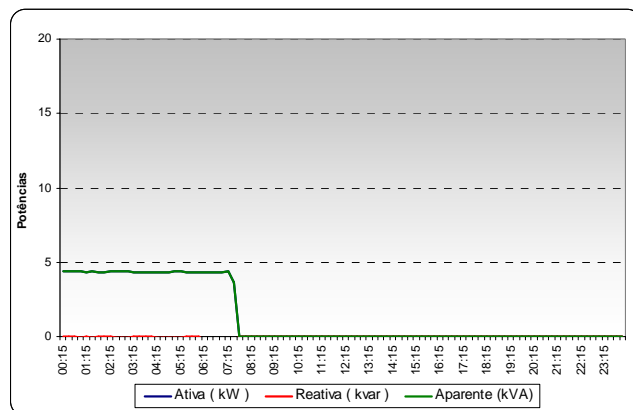


8.5 Curvas de Carga – 35Hz (1015rpm)

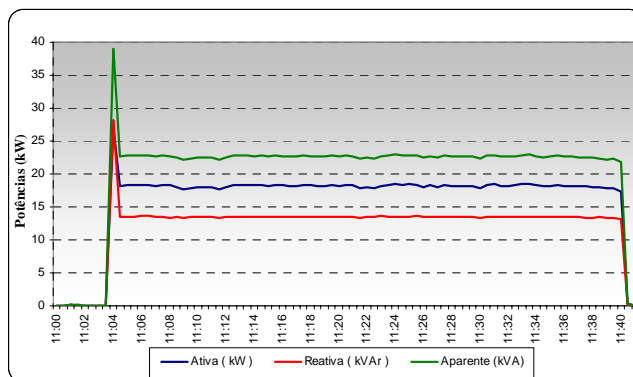




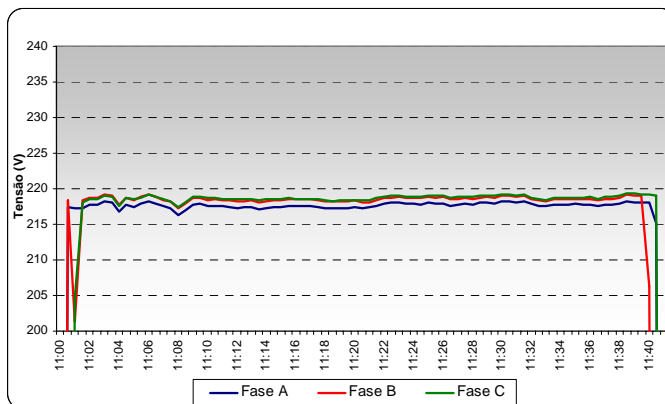




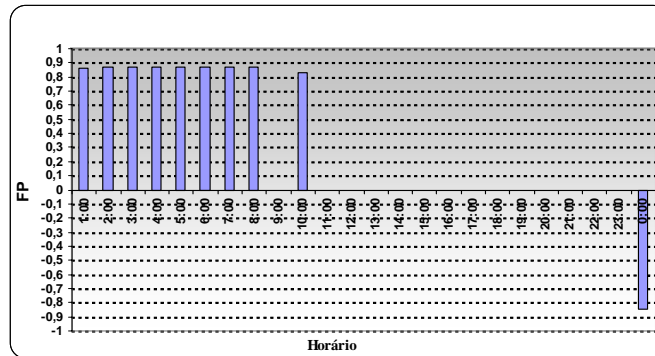
8.6 Curvas de Carga – 60Hz (1765rpm) - a vazio



8.7 Medição de Tensão



8.8 Fator de Potência 60Hz (1765rpm)



8.9 Fator de Potência 48Hz (1405rpm)

