

ADRIANO DIVINO LIMA AFONSO

DESENVOLVIMENTO E AVALIAÇÃO DE UM GERADOR DE DIÓXIDO DE  
CARBONO PARA O ARMAZENAMENTO DE GRÃOS

Tese apresentada à Universidade  
Federal de Viçosa, como parte das  
exigências do Programa de Pós-  
graduação em Engenharia Agrícola, para  
obtenção do título de “Doctor Scientiae”.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2001

*A vocês, que acreditaram em mim,  
dedico este trabalho:  
meus pais, Jayme e Wanda, meus  
irmãos, e Clarissa.*

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Jayme e Wanda, pelo exemplo de vida.

A meus irmãos, cunhados e sobrinhos por todos os momentos de alegria.

A Clarissa Oliveira Mascarenhas, pela paciência, compreensão, amor e carinho.

À Universidade Estadual do Oeste do Paraná, à Universidade Federal de Viçosa e a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela oportunidade de realizar este curso e pelo suporte financeiro.

Ao professor Juarez de Sousa e Silva, pela amizade, orientação e participação ativa e direta neste trabalho.

Aos professores Adílio Flauzino de Lacerda Filho e Lêda Rita D’Antonino Faroni, pelos conselhos e orientações.

Ao professor Alexandre Santos Pimenta, especialmente, pela amizade.

Ao funcionário Francisco Carlos Alves Neto, pelo auxílio na construção do equipamento.

Aos funcionários Silas, Sebastião Jorge, Edson, Antônio, José Rodrigues, José Eustáquio, pelo auxílio na condução do experimento.

Aos funcionários José Mauro, Edna e José Galinário, pela amizade.

Aos amigos e professores do Departamento de Engenharia Agrícola e a todos que, direta ou indiretamente, colaboraram para a realização deste trabalho.

## BIOGRAFIA

ADRIANO DIVINO LIMA AFONSO, filho de Jayme Afonso Ribeiro e Wanda Lima Ribeiro, nasceu na cidade de Araxá, Estado de Minas Gerais, no dia 6 de junho de 1965.

Em janeiro de 1991, graduou-se em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal de Viçosa.

Em março de 1991, ingressou no Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa.

Em agosto de 1993, submeteu-se à defesa de tese, logrando aprovação.

Em março de 1994, ingressou na Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como professor Assistente.

Em março de 1997, ingressou no Curso de Doutorado em Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa.

Em fevereiro de 2001, submeteu-se à defesa de tese, logrando aprovação.

## RESUMO

AFONSO, Adriano Divino Lima, D.S., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2001. **Desenvolvimento e avaliação de um gerador de dióxido de carbono para o armazenamento de grãos.** Professor orientador: Juarez de Sousa e Silva. Professores conselheiros: Adílio Flauzino de Lacerda Filho, Lêda Rita D'Antonino Faroni e Evandro de Castro Melo.

Este trabalho objetivou desenvolver e avaliar em condições de campo um equipamento modificador de atmosfera (Gerador de CO<sub>2</sub>) visando o controle da atividade de insetos em grãos armazenados em silos semi-herméticos, adaptados para reterem os gases. Foi construído um protótipo, capaz de alterar a atmosfera intergranular da massa de grãos armazenada, constituído, basicamente de: uma fornalha para combustão do carvão vegetal, um trocador de calor para arrefecimento dos gases, um sistema de refrigeração com finalidade de reduzir a umidade relativa dos gases e um ventilador. Para avaliar o protótipo e seus componentes, sensores para leitura das concentrações de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> e de temperaturas foram instalados no equipamento e em um silo semi-hermético construído em ferro-cimento. Para avaliar o efeito da atmosfera produzida pelo protótipo no controle de pragas que infestam os produtos armazenados, 27 t de milho infestado com *Sitophilus zeamais* foram armazenados no silo. Para avaliação do efeito da atmosfera produzida pelo protótipo no controle do inseto e sob as qualidades fisiológica e química do milho, amostras do produto foram retiradas do silo e analisadas. Pelas análises dos dados e a interpretação dos resultados obtidos, conclui-se que o equipamento

desenvolvido mostrou ser capaz de produzir uma atmosfera desfavorável aos insetos, em razão do efeito sinérgico da baixa concentração de O<sub>2</sub> e da relativamente alta concentração de CO<sub>2</sub>. As concentrações médias de O<sub>2</sub> (aproximadamente 4,0% em volume nas cinco primeiras semanas do experimento) e de CO<sub>2</sub> (aproximadamente 13,4%) obtidas no interior do silo, foram adequadas para controlar as pragas que infestam os grãos armazenados. Observou-se que a partir do trigésimo dia sob efeito da atmosfera produzida pelo protótipo, a geração F1 do *S. zeamais* reduziu a sua postura e, conseqüentemente, o seu desenvolvimento, resultando em um controle de cerca de 91,1% na geração F2. O controle da infestação do inseto foi maior com o aumento do período de exposição à atmosfera produzida pelo protótipo. A utilização da atmosfera produzida pelo equipamento teve efeito de reduzir a proliferação do *S. zeamais* na massa de grãos armazenada no silo, impedindo o seu desenvolvimento normal. Verificou-se, também, que, não houve efeito significativo do tratamento a que o produto foi submetido no silo no índice de vigor e na germinação do milho. Em termos de qualidade, o milho sob efeito da atmosfera produzida pelo protótipo apresentou melhores índices característicos de inferência de qualidade, quando comparado com o milho armazenado sob condições climáticas normais. Os resultados obtidos no controle do *S. zeamais* demonstram a viabilidade da utilização de equipamentos geradores de CO<sub>2</sub> no controle de pragas de grãos armazenados em silos semi-herméticos.

## ABSTRACT

AFONSO, Adriano Divino Lima, D.S., Universidade Federal de Viçosa, February 2001.  
**Development and evaluation of a carbon-dioxide generator for grain storage.**  
Adviser: Juarez de Sousa e Silva. Committee members: Adílio Flauzino de Lacerda Filho, Leda Rita D'Antonino Faroni e Evandro de Castro Melo.

The objective of this study was to develop and evaluate an atmosphere-modifier equipment (CO<sub>2</sub> generator) under field conditions in order to control the activity of insects in grains stored at semi-hermetic store adapted to retaining the gases. A prototype able to alter the inter-grain atmosphere of the stored grain mass was built, and was basically constituted as following: a furnace for combustion of the vegetable coal, a heat exchanger for gas cooling, a refrigeration system for reducing the relative humidity of the gases, and a fan. To evaluate the prototype and its components, the sensors for reading the concentrations of CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub> and temperatures were installed in the equipment as well as in a semi-hermetic store built with iron-cement. To evaluate the effect from the atmosphere produced by the prototype in controlling the plagues that infest the stored products, 27 ton of maize infested with *Sitophilus zeamais* were stored in the store. For evaluation of the effect from the atmosphere produced by the prototype in controlling the insect, as well as upon the physiologic and chemical qualities of the maize, samples of the product were removed from the store and analyzed. According to data analysis and the interpretation of the obtained results, it was concluded that the developed equipment showed to be able to

produce an atmosphere unfavorable to insects due to the synergistic effect from low concentration of O<sub>2</sub> and relatively high concentration of CO<sub>2</sub>. The average concentrations of O<sub>2</sub> (approximately 4.0% at the first five weeks of the experiment) and those of CO<sub>2</sub> (approximately 13.4%) obtained inside store were adequate to control the plagues infesting the stored grains. It was observed that from the 30<sup>o</sup> day under the effect from the atmosphere produced by the prototype the generation F1 of the *S. zeamais* reduced their posture and consequently their development, so resulting in a control about 91.1% upon generation F<sub>2</sub>. The control upon insect infestation was higher when increasing the period of exhibition to the atmosphere produced by the prototype. The use of the atmosphere produced by the equipment had a reducing effect upon proliferation of the *S. zeamais* in the grain mass stored in the store, by hindering its normal development. It was also verified that there was no significant effect from the treatment to which the product was submitted in the store upon the vigor index and the maize germination. In qualitative terms, the maize which was under the effect from the atmosphere produced by the prototype presented better characteristic indexes for quality inference, when compared with the maize stored under normal climate conditions. The results obtained in controlling the *S. zeamais* really demonstrate the viability for using the CO<sub>2</sub> generating equipments for controlling the plagues of the grains stored in semi-hermetic stores.

## CONTEÚDO

	Página
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1. Armazenamento em Atmosfera Controlada/Modificada	6
2.1.1. Armazenamento de Grãos em Célula Hermética	7
2.1.2. Introdução de um Gás Inerte na Célula Armazenadora	9
2.1.3. Queima do Oxigênio em Geradores de Gases	9
2.2. Trocas Gasosas nos Insetos	11
2.3. Gases Utilizados em Atmosfera Modifica/Modificada	12
2.3.1. Nitrogênio	12
2.3.2. Oxigênio	13
2.3.3. Dióxido de Carbono	14
2.3.3.1. Ação do Dióxido de Carbono sobre os Grãos	15
2.3.3.2. Ação do dióxido de carbono sobre os Insetos	16
2.3.3.3. Ação do dióxido de carbono sobre os Microrganismos	19
2.3.3.4. Ação do dióxido de carbono sobre o Homem	20
2.3.3.5. Ação do Dióxido de Carbono sobre a Estrutura Armazenadora	20
2.3.4. Combinação Dióxido de Carbono e Fosfina	21
2.4. Tratamentos Químicos	22
2.4.1. Fosfina	22
2.4.2. Brometo de Metila	23
2.5. Hermeticidade da Estrutura	23
2.6. Custo da Armazenagem em Atmosfera Modificada/Controlada	25
2.7. Subsídios Teóricos para Dimensionamento de Geradores de CO <sub>2</sub>	26
3. MATERIAL E MÉTODOS	30
3.1. Preparo do Silo Experimental	30
3.1.1. Dutos de Aeração	30
3.1.2. Vedação do Silo	32
3.1.3. Instrumentação do Silo	32
3.2. Protótipo (equipamento Gerador de CO <sub>2</sub> )	34

3.2.1. Forno para a Queima do Carvão Vegetal	35
3.2.2. Trocador de Calor	36
3.2.3. Sistema de Refrigeração	37
3.2.4. Ventilador Centrífugo	38
3.2.5. Operação do Protótipo	38
3.3. Instrumentação do Protótipo	39
3.4. Carvão Vegetal	40
3.5. Testes Preliminares	41
3.6. Caracterização do Milho	42
3.7. Análises Qualitativas do Milho	42
3.7.1. Análises Fisiológicas do Milho	42
3.7.2. Análises Físioquímicas do Milho	43
3.8. Amostragem Testemunha do Milho	44
3.9. Período Experimental	45
3.9.1. Amostragem Experimental do Milho	45
3.9.2. Funcionamento do Protótipo	45
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	47
4.1. Testes Preliminares	47
4.1.1. Testes com a Forno Original	47
4.1.2. Testes com a Forno	50
4.1.3. Vedação do Silo	52
4.2. Período Experimental	54
4.2.1. Vazão dos Gases no Protótipo	54
4.2.2. Produção de CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> no Protótipo	55
4.2.3. Temperatura e Umidade Relativa dos Gases no Protótipo	58
4.2.4. Consumo de Carvão Vegetal	62
4.2.5. Tempo de Operação do Protótipo	63
4.2.6. Concentrações de CO <sub>2</sub> e O <sub>2</sub> no Silo	64
4.2.7. Temperaturas no Interior do Silo	70
4.3. Caracterização do Milho	71
4.3.1. Umidade do Milho	72
4.3.2. Vigor e Germinação do Milho	73
4.3.3. Testes de Qualidade do Milho	74
4.4. Avaliação do Controle de Insetos	76
4.4.1. Percentagem de Infestação	76
4.4.2. Contagem de Insetos	77
5. RESUMO E CONCLUSÕES	83
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88
APÊNDICE A	95
APÊNDICE B	119

## 1 - INTRODUÇÃO

Tendo em vista a necessidade constante de melhorar a qualidade do produto agrícola, em um futuro próximo o método de controle químico e outros métodos tradicionais de conservação de grãos armazenados que objetivam reduzir as perdas pós-colheita ocasionadas por pragas poderão não ser mais aceitáveis, por motivo de saúde, econômico e ecológico.

As pragas de produtos armazenados em condições de clima tropical, particularmente os insetos, têm importância significativa como agentes causadores de perdas quantitativas e qualitativas nos grãos, pelo fato de encontrarem um ambiente propício ao seu desenvolvimento.

Para prevenir e controlar as pragas que infestam os grãos armazenados, substâncias químicas são utilizadas em primeiro lugar. A proporção de sua utilização e a importância dos métodos físicos e biológicos de controle de pragas têm aumentado durante a última década. A razão para essa tendência são as restrições impostas por muitos países ao tratamento químico de grãos armazenados, bem como a demanda sempre crescente de produtos livres de resíduos químicos, especialmente por parte dos consumidores dos países industrializados. Considerando que os métodos biológicos têm ainda hoje importância prática bastante limitada, alguns métodos físicos alternativos já são rotineiros em vários países. Em algumas circunstâncias, o uso prático das técnicas alternativas é limitado pelo custo de sua aplicação (GWINNER et al., 1996).

O armazenamento em atmosfera modificada ou em atmosfera controlada são técnicas alternativas para proteção da massa de grãos armazenada e de controle das pragas que o infestam, mantendo a qualidade do produto sem nenhum uso de pesticida. Basicamente, essas técnicas de conservação de grãos consistem em substituir a atmosfera intersticial da massa de grãos pela injeção de um gás ou uma mistura de gases considerados inertes (nitrogênio e dióxido de carbono), até que o teor de oxigênio seja reduzido a um valor residual. O objetivo desses métodos alternativos de conservação de grãos armazenados é atingir o sistema respiratório do inseto em sua demanda de oxigênio e, ao mesmo tempo, aproveitar o efeito nocivo da alta concentração dos outros gases, principalmente o dióxido de carbono.

Para obtenção do sucesso no controle das pragas, ALAGUSUNDARAM et al. (1995) comentaram que os gases que deverão ser introduzidos à temperatura adequada, para a conservação dos grãos, precisam ser uniformemente distribuídos no interior do silo e mantidos em concentração adequada por um período mínimo requerido de exposição. Estudos têm mostrado que espécies de insetos reagem diferentemente às condições impostas pela atmosfera intergranular, dependendo do estágio de vida do inseto, da temperatura, do teor de umidade do grão e da composição gasosa da atmosfera.

A hermeticidade do sistema armazenador é condição necessária para a utilização das técnicas de armazenamento em atmosfera modificada ou controlada visando o controle eficaz de pragas, visto que garantirá a manutenção da concentração de oxigênio em níveis reduzidos durante o período de tempo necessário para alcançar o nível de controle desejável. Em face desta restrição, a utilização de ambientes herméticos torna-se uma alternativa economicamente viável apenas no armazenamento de pequenos volumes de grãos.

De acordo com BANKS e ANNIS (1980), a utilização das técnicas de armazenamento em atmosfera modificada ou controlada em ambientes não-herméticos é uma alternativa tecnicamente viável, desde que seja possível o fornecimento a baixo custo de uma atmosfera rica em dióxido de carbono. Para ELLIS (1984), construir ou adaptar grandes células armazenadoras existentes em ambientes herméticos é economicamente inviável.

ALAGUSUNDARAM et al. (1995) afirmaram que o armazenamento de grãos em atmosfera modificada ou em atmosfera controlada poderá ser utilizado efetivamente e

em ampla escala no controle de pragas, se puder ser aplicado em células não-herméticas. Uma solução para a utilização dessas técnicas em célula de armazenamento não-hermética, citada por REICHMUTH (1990), consiste na obtenção a baixo custo do dióxido de carbono pela simples queima de um combustível, disponível próximo à unidade armazenadora, em geradores de dióxido de carbono. Essa geração de dióxido de carbono é realizada em intervalos de tempo regulares, dependendo do grau de hermeticidade da célula armazenadora e do nível de infestação de insetos, de forma a repor as concentrações gasosas adequadas ao controle das pragas no interior da célula armazenadora.

Há vasta literatura que descreve a utilização das técnicas de atmosfera controlada sobre pragas que infestam os grãos armazenados. A maioria dos estudos está concentrada no controle de espécies de insetos adultos em condições de laboratório, e a maioria dos testes em grande escala sobre armazenamento em atmosfera controlada em silos tem sido conduzida em células herméticas. Assim, este trabalho teve como objetivos:

- Desenvolver um equipamento gerador de dióxido de carbono, visando o controle da atividade de insetos em grãos armazenados em silos convencionais, pela produção de uma atmosfera letal ou desfavorável ao desenvolvimento das pragas.

- Avaliar, em condições de campo, o equipamento desenvolvido no controle do *Sitophilus zeamais* presente no milho armazenado em um silo semi-hermético, construído de ferro-cimento (a produção da mistura gasosa será *in situ*, utilizando como combustível o carvão vegetal).

- Otimizar o processo de produção de dióxido de carbono, estudando as opções de manejo do sistema.

- Avaliar o efeito da atmosfera produzida no controle efetivo do *S. zeamais*, em todas as suas fases de desenvolvimento.

- Avaliar o efeito do tratamento na qualidade fisiológica e química do milho.

## 2 - REVISÃO DE LITERATURA

As futuras instalações dos sistemas de armazenagem de grãos deverão ser projetadas para preservar fisicamente a integridade dos grãos armazenados, objetivando eliminar a probabilidade de danos que reduzam a qualidade nutricional do alimento. Técnicas alternativas de conservação de produtos agrícolas permitirão a estes sistemas controlarem as pragas que infestam os grãos armazenados, mantendo alta qualidade do produto sem nenhum uso de pesticida residual. Padrões integrados de manejo de pragas serão ferramentas de diagnóstico que poderão ser utilizados de forma a monitorar os sistemas física (temperatura do grão, umidade do ar e teor de umidade do grão, etc.), química (composição atmosférica do ar intergranular, tipos de resíduo e níveis de vapores do fumigante, etc.) e biologicamente (identificar os tipos de insetos, estágios de desenvolvimento e populações, etc.).

Atualmente, a técnica de proteção contra a infestação de insetos nos grãos armazenados mais utilizada no mundo é o controle químico, utilizando-se de pesticidas, principalmente o fumigante fosfina. É a técnica mais empregada, por ser eficiente no controle de todas as fases do inseto, necessitar de curto período de tempo de exposição e apresentar baixo custo e fácil manejo (DESMARCHELIER, 1997).

Previamente, os pesticidas convencionais utilizados na proteção de produtos armazenados estão sendo restringidos ou banidos, devido aos danos causados à saúde, ao ambiente, ao potencial perigo apresentado ao operador durante a aplicação desses produtos químicos (ALAGUSUNDARAM et al., 1995) e ao desenvolvimento de resistência do inseto ao pesticida (PRICE e MILLS, 1988; FIELDS, 1992). De acordo com GRAVER (1990), os motivos que parecem ter levado ao desenvolvimento de resistência ao

inseticida são as condições inadequadas de utilização, como falta de hermeticidade durante sua aplicação, tempo insuficiente de exposição e aplicações de doses subletais.

Algumas dessas técnicas alternativas que reduzem estes riscos é a proteção do produto armazenado utilizando a conservação em atmosfera modificada ou em atmosfera controlada. De acordo com SUBRAMANYAM e HAGSTRUM (2000), no armazenamento em atmosfera controlada a composição atmosférica no interior do silo é controlada ou mantida em nível letal aos insetos e microrganismos, e no armazenamento em atmosfera modificada, a composição atmosférica no silo é alterada durante o período de tratamento. SEMPLE et al. (1992) associaram a técnica de conservação de grãos em atmosfera modificada à respiração de insetos e microrganismos que utilizam o oxigênio atmosférico intergranular para converter carboidratos em dióxido de carbono e água em célula de armazenagem com ventilação deficiente.

De acordo com BANKS (1984), a utilização dessas técnicas de armazenamento tem importante função em sistemas integrados para proteção de grãos, com particular aplicação onde há necessidade de tratamentos livres de resíduos químicos.

Há alguns anos o uso das técnicas de atmosfera modificada ou controlada tem sido introduzido como métodos alternativos de controle de pragas em grãos armazenados em várias partes do mundo. Como impedimentos à difusão e adoção dessas técnicas para a proteção dos grãos armazenados em larga escala, BANKS (1984) citou a necessidade de a célula armazenadora ser hermética e requerer longo tempo de exposição para a completa eficiência no controle das pragas, bem como a falta de métodos econômicos convenientes e de fornecimento dos gases requeridos.

Nos últimos anos, os pesquisadores de armazenamento de grãos em atmosfera modificada e em atmosfera controlada têm se concentrado principalmente nos seguintes aspectos: minimização de custo e maximização da segurança, melhorando os métodos de geração de atmosferas com baixa concentração de oxigênio; estudo da resistência

potencial ao dióxido de carbono; e melhoria dos métodos para definir o tempo de exposição requerido para altos índices de desinfestação.

De acordo com ALAGUSUNDARAM et al. (1996a), armazenamento em atmosfera modificada ou controlada é a conservação do produto em ambientes com elevado

nível de dióxido de carbono ou baixo nível de oxigênio, sendo um método livre de resíduo para o controle de pragas em grãos armazenados. Para BANKS e ANNIS (1980), nesses métodos de conservação de grãos, a composição gasosa da atmosfera intergranular é alterada injetando-se dióxido de carbono ou nitrogênio para gerar uma atmosfera letal às pragas dos grãos armazenados, com baixa concentração de oxigênio. ANNIS e DOWSETT (1995) comentaram que, na prática, a atmosfera intergranular alterada pode ser obtida por qualquer dos três métodos: adição de altas concentrações de dióxido de carbono, adição de altas concentrações de nitrogênio ou adicionando ar em que tenha sido esgotado o oxigênio e que tenha sido enriquecido com dióxido de carbono por combustão.

### **2.1. Armazenamento em Atmosfera Modificada ou Controlada**

O homem tem utilizado o armazenamento de produtos agrícolas em atmosfera modificada ou controlada há vários séculos. O armazenamento hermético de produtos básicos para alimentação humana em jarros de barro foi uma técnica de conservação utilizada pelos egípcios séculos atrás e persiste até hoje, principalmente no continente africano.

Atualmente, na utilização das técnicas de armazenamento em atmosfera modificada ou em atmosfera controlada, a atmosfera intergranular é alterada com a adição de dióxido de carbono, nitrogênio ou pela recirculação de produtos da combustão, com o objetivo de obter ambientes com baixa concentração de oxigênio. A vantagem desses métodos consiste no fato de se atingir o sistema respiratório do inseto em sua demanda de oxigênio e, ao mesmo tempo, aproveitar o efeito tóxico da alta concentração de dióxido de carbono ou de nitrogênio. Dessa forma, várias combinações de gases atmosféricos têm sido testadas, visando formar uma atmosfera letal às pragas de grãos armazenados: alta concentração de  $\text{CO}_2$  e, ou,  $\text{N}_2$  em substituição ao  $\text{O}_2$ ; alta concentração de  $\text{CO}_2$  com redução do  $\text{O}_2$  por meio de sua queima; e armazenamento do produto em estruturas herméticas, com redução do  $\text{O}_2$  e aumento do  $\text{CO}_2$  pelo processo respiratório de componentes do ecossistema armazenado. Em todas essas combinações, segundo STOREY (1973), o potencial letal das atmosferas é aumentado quando se aumenta a temperatura do tratamento ou o período de exposição.

A adoção de uma ou outra combinação de gases para aplicação em condições de armazenamento irá depender da facilidade e do custo de obtenção destes. Em unidades armazenadoras próximas das fontes do CO<sub>2</sub> líquido, pode ser mais vantajoso, operacional e economicamente, utilizá-lo, porém, quando o suprimento de CO<sub>2</sub> estiver distante do consumidor, pode ser mais econômico realizar a queima do oxigênio contido na atmosfera intergranular, visando diminuir a sua concentração.

SEMPLE et al. (1992) comentaram que o armazenamento em atmosfera controlada tem as seguintes vantagens: geralmente mata os insetos em todas as suas fases e outros animais indesejáveis que podem estar presentes nos grãos; previne a entrada de insetos e roedores; e impede que o grão com elevado teor de umidade fique mofado e aqueça, embora não previna a respiração anaeróbia.

De acordo com REICHMUTH (1990), ambientes com atmosferas modificada e controlada podem ser obtidos por um ou mais dos seguintes métodos: armazenamento do produto em célula hermética, introdução de um gás inerte na célula de armazenamento e gerando dióxido de carbono pela queima do oxigênio.

#### *2.1.1. Armazenamento de grãos em célula hermética*

Trata-se do método de conservação de produtos agrícolas mais tradicional, em que os grãos secos são armazenados em um ambiente totalmente hermético, obtendo-se a redução da concentração de oxigênio nos espaços intergranulares por meio da respiração dos grãos, insetos e dos organismos que porventura estiverem presentes no produto armazenado. Neste caso, o oxigênio é gradualmente consumido, com elevação da concentração de dióxido de carbono, resultando na morte das pragas por asfixia.

Segundo SEMPLE et al. (1992), em grãos secos armazenados em condições de hermeticidade, os insetos que os infestam utilizam o oxigênio disponível até se asfixiarem, isto é, se a concentração de oxigênio diminuir para menos de 2% na atmosfera intergranular, pois eles são essencialmente aeróbios.

Com relação à produção de dióxido de carbono pelos produtos agrícolas armazenados, Bailey e Gurjar, citados por AL-YAHYA et al. (1993), foram os primeiros pesquisadores que utilizaram a produção de dióxido de carbono como um método quantitativo para medir a taxa de respiração.

A respiração bruta de uma massa de grãos sob condição aeróbia tem sido modelada como a oxidação completa do carboidrato e é representada pela seguinte reação de combustão (STEELE et al., 1969):



De acordo com a reação de combustão, uma perda de 1% de matéria seca corresponde ao desprendimento de 14,7 g CO<sub>2</sub> kg<sup>-1</sup> de matéria seca do grão.

Monro, citado por SEMPLE et al. (1992), afirmou que a quantidade de oxigênio consumido por grãos de cereais com baixo teor de umidade é maior do que a quantidade de dióxido de carbono liberado, ou seja, o quociente respiratório é menor que uma unidade. Em relação à respiração dos insetos, o pesquisador concluiu que o *S. granarius* é menos ativo que o *S. oryzae*, pois encontrou quocientes respiratórios iguais a 0,815 e 0,773, respectivamente.

Os fatores que afetam a produção do CO<sub>2</sub> no processo de respiração dos produtos agrícolas e no crescimento de microrganismos são o teor de umidade do produto, a temperatura de armazenamento, os danos mecânicos (STEELE et al., 1969), a atividade de água e o histórico do lote de grãos (ANNIS et al., 1997).

Com relação à produção de monóxido de carbono pelo grão, WHITTLE et al. (1999) afirmaram que medidas realizadas em grãos armazenados mostraram que o CO foi detectado e que foram constatadas perigosas concentrações em armazenagem hermética. ANNIS et al. (1997) comentam que, embora a produção de CO em grãos armazenados certamente não se deva ao processo de respiração, a sua taxa de produção é convenientemente estudada junto com a taxa de CO<sub>2</sub>. Ainda, de acordo com os pesquisadores, estudos têm mostrado que a taxa de produção de CO é claramente relacionada à taxa de produção de CO<sub>2</sub>.

O método de armazenamento de grãos em atmosfera modificada ou em atmosfera controlada apresenta como principal característica à necessidade de hermeticidade do sistema armazenador, ou seja, o produto é conservado em uma célula armazenadora vedada, onde são mínimas as trocas de gases entre o meio ambiente e o interior desta. De acordo com REICHMUTH (1990), este é o principal obstáculo à disseminação desses métodos de armazenamento, visto que, para obtenção de uma perfeita hermeticidade do sistema, o custo de implantação ou de adaptação de células existentes é bastante elevado.

### *2.1.2. Introdução de um gás inerte na célula armazenadora*

Em face da restrição de hermeticidade total do sistema imposta pelo método anterior, uma técnica alternativa consiste na redução da concentração de oxigênio nos espaços intergranulares, por meio da introdução de nitrogênio (SHEJBAL, 1979, 1980; TRANCHINO et al., 1980; Zanon, citado por BANKS, 1984), dióxido de carbono (NAVARRO et al., 1986; WHITE e JAYAS, 1991; WHITING e HEUVEL, 1995; MITCHAM et al., 1997) ou uma mistura destes (MARZKE et al., 1970; STOREY, 1973, 1975; SPRATT et al., 1985; KRISHNAMURTY et al., 1986;) nas células armazenadoras. O objetivo desta técnica de armazenagem é atingir o sistema respiratório do inseto em sua demanda de oxigênio, com aplicações regulares dos gases dióxido de carbono e, ou, nitrogênio nos ambientes semi-herméticos comumente encontrados em unidades armazenadoras.

Segundo SEMPLE et al. (1992), como a atmosfera é gerada externamente, a combinação da mistura dos gases pode ser manipulada de forma que produza um efeito sinérgico letal às pragas que infestam os produtos armazenados. Contudo, os custos envolvidos em sua implantação e na operação do sistema são relativamente elevados, devido à não-disponibilidade comercial de gases inertes próximo dos sistemas armazenadores, razão pela qual essa técnica, na prática, não é utilizada em grande escala.

### *2.1.3. Queima do oxigênio em geradores de gases*

Este método de obtenção da atmosfera desfavorável às pragas consiste na queima de combustíveis em equipamentos denominados geradores de gases, utilizando-se do oxigênio presente na massa de grãos armazenada ou proveniente do ar atmosférico. As técnicas de geração dos gases dióxido de carbono e nitrogênio, segundo BANKS (1984), podem ser divididas em três categorias, de acordo com a mistura de gases produzida:

geradores de nitrogênio (< 1% O<sub>2</sub>); geradores de mistura nitrogênio-dióxido de carbono (< 1% O<sub>2</sub>), incluindo os sistemas de armazenamento hermético; e geradores de dióxido de carbono.

Pode-se dizer, em termos práticos, que a composição volumétrica média do ar intergranular é próxima à do ar atmosférico, ou seja, 78% de N<sub>2</sub>, 21% de O<sub>2</sub> e 1% de outros gases, incluindo o CO<sub>2</sub>. Dessa forma, a proporção volumétrica máxima de dióxido de carbono que se pode obter nos gases provenientes da queima de um combustível é de cerca de 21%, considerando uma combustão completa, ou seja, se todo o oxigênio presente no ar reagir com o combustível no interior do gerador e produzir dióxido de carbono, água e energia (CETEC, 1988).

BANKS (1984) comentou que uma variedade de materiais carbônicos, incluindo madeira, carvão vegetal, casca de arroz, palha e outros resíduos agrícolas, pode ser convertida por combustão em uma mistura variável de gases com composição dependente do combustível. Os gases produzidos fornecem uma mistura de exaustão com baixa concentração de oxigênio.

No início da década de 20, Winterbottom, citado por BANKS (1984), utilizou um sistema gerador de gases tendo como combustível o coque, e os gases gerados da combustão foram utilizados para a conservação de grãos armazenados.

De acordo com BANKS e ANNIS (1980), a utilização das técnicas de armazenamento em atmosfera modificada ou em atmosfera controlada em ambientes pouco herméticos é uma alternativa tecnicamente viável, desde que seja possível o fornecimento a baixo custo de uma atmosfera rica em CO<sub>2</sub>. Neste caso, deve-se estabelecer o critério ideal de manejo para controle e manutenção das populações em níveis mínimos aceitáveis, se possível à eliminação completa de pragas.

REICHMUTH (1990) afirmou que a principal vantagem da utilização destes métodos de armazenagem é a obtenção a baixo custo do gás inerte (dióxido de carbono) pela simples queima de um combustível (carvão vegetal, óleo diesel, GLP, etc.) disponível próximo à unidade armazenadora, além da não-necessidade de total hermeticidade das células armazenadoras. De acordo com o pesquisador, esta vantagem é explicada pela facilidade na obtenção e pelo baixo custo na geração do dióxido de carbono, além da operação do sistema, que é realizada em intervalos de tempo regulares,

dependendo do grau de hermeticidade da célula armazenadora e do nível de infestação de insetos.

Como desvantagem desse método de obtenção do gás inerte, há de se ter cuidados durante a operação de queima do combustível, com utilização de equipamentos apropriados ao acompanhamento das características químicas e físicas dos gases provenientes da combustão e que serão injetados na célula armazenadora. Durante a queima do combustível deve-se ter como objetivo a sua queima estequiométrica, evitando-se que ela seja incompleta, o que formaria monóxido de carbono, gás altamente explosivo e tóxico ao ser humano. Anon, citado por BANKS (1984), comentou que o nível máximo permitido nos Estados Unidos para o monóxido de carbono produzido em geradores de gases é de 4,5%.

## **2.2. Trocas gasosas nos insetos**

Como é comum em todos os organismos aeróbios, o inseto necessita obter oxigênio do ambiente e eliminar gás carbônico. Esse fenômeno de troca gasosa ocorre por meio de um sistema traqueal interno que se ramifica através do corpo do inseto. As ramificações estão em contato com todos os órgãos internos e tecidos do inseto e são particularmente numerosas em tecidos com alta demanda de oxigênio.

De acordo com CHAPMAN (1998), as traquéias são extensões cuticulares do exoesqueleto, formando um sistema tubular que leva o ar às células. Essa rede de tubos se abre para o meio externo através de pares de segmentos de orifícios dispostos lateralmente no corpo do inseto, denominados espiráculos, os quais são constituídos tipicamente por uma câmara ou átrio, provido por válvulas com mecanismos de abertura e fechamento.

Considera-se que a função dos espiráculos seja a de controlar a difusão dos gases nos insetos. Quando os espiráculos estão fechados, qualquer órgão ativo ou tecido pode retirar o  $O_2$  de qualquer parte do sistema, e os níveis de  $O_2$  são restabelecidos pela abertura de um simples par de espiráculos. Normalmente os espiráculos são mantidos fechados e somente são abertos o tempo suficiente para o inseto ser suprido de  $O_2$ . Se a taxa de metabolismo do inseto for aumentada devido a elevadas temperaturas ou em circunstâncias como no auge da digestão e na produção de ovos pela fêmea, outros

espiráculos são ativados e abertos mais freqüentemente por maior período de tempo, o que resulta no aumento da taxa de perda de água. A maior parte da perda de água nos insetos acontece por evaporação nos espiráculos. Segundo SEMPLE et al. (1992), o movimento dos espiráculos é regulado pelo sistema nervoso central, sendo estimulado pela taxa de CO<sub>2</sub> presente no meio.

Quando as exigências de O<sub>2</sub> são grandes, movimentos de bombeamento ventilatório são iniciados e o ritmo de abertura e fechamento dos espiráculos é modificado de tal forma que um fluxo dirigido de ar é forçado pelo sistema. O sistema necessita de uma complexa coordenação nervosa entre os movimentos de bombeamento e regulamentares dos espiráculos.

O centro respiratório secundário, localizado em um dos segmentos torácicos, tem a função de controlar os movimentos de trocas gasosas do inseto como um todo, podendo ser estimulado por tensões de 0,2 a 3,6% de CO<sub>2</sub>, enquanto os centros primários (segmentos isolados do abdômem) podem ser ativados na presença de 12 a 15% de CO<sub>2</sub>. O movimento de bombeamento ventilatório nos insetos pode ocorrer na presença de 10% de CO<sub>2</sub>, mesmo quando o inseto está em repouso. É provável que alguns incentivos químicos ajam em todos os casos de trocas gasosas, como o aumento da acidez no sistema nervoso central, devido ao excesso de CO<sub>2</sub>, ou a acumulação de ácido metabólico, resultado da ausência de O<sub>2</sub> (SEMPLE et al., 1992).

### **2.3. Gases utilizados em Atmosfera Modificada/Controlada**

#### *2.3.1. Nitrogênio*

Segundo BANKS e ANNIS (1977), o armazenamento utilizando o gás nitrogênio pode ser dividido em duas fases. Na primeira, denominada *purga*, a atmosfera desejada é obtida na célula pela injeção ininterrupta do gás nitrogênio em substituição do ar intergranular até que a concentração de oxigênio no espaço superior do silo tenha sido reduzida a 1%. A segunda fase é chamada de *manutenção*, devido à injeção periódica de gás nitrogênio com finalidade de manter a sua concentração desejada na célula armazenadora. Ainda de acordo com os pesquisadores, a quantidade de nitrogênio durante as fases é dependente do fluxo do gás durante o enchimento, da porosidade dos diferentes produtos e da hermeticidade do sistema armazenador. O nitrogênio líquido é

fornecido sob pressão, normalmente em caminhões-tanques, e, ao sair deste, passa através de um trocador de calor, onde é vaporizado, obtendo-se uma temperatura final próxima a 2°C.

Tanto o N<sub>2</sub> puro quanto o CO<sub>2</sub> puro têm méritos em programas não-poluentes de controle de insetos, embora existam pesquisadores que tenham encontrado diferentes resultados na avaliação de seus efeitos. Zaklandnoi, citado por BAILEY e BANKS (1980), mostrou que o CO<sub>2</sub> puro pode ser mais rapidamente tóxico que o N<sub>2</sub> puro, para adultos de *S. oryzae* e *S. granarius* em três temperaturas experimentais (20, 25 e 35°C), e que o N<sub>2</sub> puro é mais dependente da temperatura que o CO<sub>2</sub> puro. JAY (1980) considerou o CO<sub>2</sub> mais eficiente que o N<sub>2</sub> nas situações em que a hermeticidade é fisicamente impossível ou em que não é economicamente viável a transformação das estruturas existentes em estruturas herméticas. Por outro lado, SEMPLE et al. (1992) comentaram que, devido ao fato de os insetos serem essencialmente aeróbios, é vantajoso utilizar o potencial do N<sub>2</sub> em células herméticas para gerar baixa concentração do O<sub>2</sub>, em preferência à ação tóxica do CO<sub>2</sub>.

O nitrogênio tem a vantagem de ocupar inicialmente 78% do espaço intergranular, porém tem sido normalmente considerado um diluente, uma vez que sua ação tem-se mostrado similar àquela dos gases inertes, como o hélio. Por ser um gás inerte, ele apresenta algumas desvantagens, como maior tempo de exposição e altas concentrações, traduzindo isto em maior custo do que o dos fumigantes tradicionais. Como vantagem da utilização da atmosfera de nitrogênio, SHEJBAL (1979) observou que a viabilidade do malte de cevada pode ser preservada por longos períodos de armazenamento e BANKS e ANNIS (1977) afirmaram que o armazenamento utilizando atmosfera de nitrogênio reduz a formação da aflatoxina por fungos de armazenamento *Aspergillus flavus*.

### 2.3.2. Oxigênio

A maioria dos animais requer oxigênio para a sua respiração, podendo morrer ou parar o crescimento quando expostos a ambientes com baixa concentração de oxigênio. Monro, citado por SEMPLE et al. (1992), comentou que é geralmente aceito

que a ausência de oxigênio é suficientemente letal aos insetos, sem considerar a presença de altas concentrações de dióxido de carbono, embora eles possam permanecer vivos por longo período sob baixa concentração de oxigênio. BAILEY (1965) demonstrou que a concentração de oxigênio precisa ser mantida abaixo de 4,5% para produzir uma atmosfera letal ao mais suscetível inseto de produto armazenado. No entanto, um limite de aproximadamente 2% na concentração de oxigênio, segundo OXLEY e WICKENDEN (1963), tem sido utilizado para assegurar a mortalidade dos insetos.

De acordo com Girish, citado por SEMPLE et al. (1992), a susceptibilidade dos vários estágios de vida do *Trogoderma granarium* (Everts) a baixas concentrações de oxigênio, produzidas biologicamente pela respiração dos grãos e insetos, foi seqüencialmente maior no ovo, na larva de primeiro ínstar, no adulto, no último ínstar larval e na pupa.

Person e Sorenson, citados por BAILEY e BANKS (1980), verificaram que atmosferas contendo 0,5% de O<sub>2</sub> são ligeiramente mais efetivas que aquelas contendo 1% de O<sub>2</sub>, particularmente em baixas temperaturas, tanto para adultos quanto para as formas imaturas de *S. oryzae*. Esse resultado foi confirmado por BELL (1984), que estudou a toxicidade da alta concentração de dióxido de carbono nos ovos de *Ephestia cautella* e *E. kuhniella* nas temperaturas de 15 e 25°C e concluiu que, em baixa temperatura, maior período de tempo é necessário para obter completa mortalidade com dióxido de carbono na presença de oxigênio do que na sua ausência. NAVARRO (1978) verificou que a resposta de adultos de *S. oryzae* para atingir uma mortalidade de 95%, a 26°C e 54% de umidade relativa (UR), foi mais sensível em uma concentração de oxigênio de 1% do que níveis menores ou maiores que 1% de O<sub>2</sub> (N<sub>2</sub> balanceado).

### 2.3.3. Dióxido de Carbono

Segundo MANN et al. (1999), ao contrário dos fumigantes químicos como brometo de metila e fosfina, que são tóxicos aos insetos em baixa concentração (em nível de partes por milhão), a concentração necessária de CO<sub>2</sub> para criar um ambiente letal aos insetos é cerca de 10.000 vezes maior (em nível de partes por centena). Portanto, para um tratamento efetivo utilizando CO<sub>2</sub>, a estrutura de armazenagem precisa ser hermeticamente fechada ou o CO<sub>2</sub> precisa ser periódica ou continuamente adicionado

para manter a concentração letal. Além disso, como este gás é cerca de 50% mais pesado que o ar, após certo tempo de sua difusão, poderá resultar em alta concentração na camada inferior da célula armazenadora. Neste caso, há necessidade de recirculação da mistura gasosa para equilibrar a concentração ao longo da célula, visando o efetivo controle das pragas (Wilson et al., citados por NAVARRO et al., 1986).

Apesar de não ser considerado um fumigante químico, o dióxido de carbono, em alta concentração, é reconhecidamente tóxico para os insetos (BOND e BUCKLAND, 1979; JAY, 1980; Busvine, citado por ANNIS e MORTON, 1997). WHITE et al. (1996) demonstraram que o CO<sub>2</sub> é tóxico para as pragas de grãos armazenados, quando expostas durante longo tempo aos níveis produzidos pela própria respiração dos insetos. Os trabalhos, em geral, têm mostrado que CO<sub>2</sub> é um possível agente de controle de insetos, porém há impedimentos para o seu uso, entre os quais a lentidão de ação e a necessidade de alto nível de hermeticidade e custo (ANNIS e MORTON, 1997).

A toxicidade do CO<sub>2</sub> depende da disponibilidade de O<sub>2</sub> na atmosfera e, conseqüentemente, da taxa de respiração dos insetos. Sabe-se que a ação do CO<sub>2</sub>, na presença de O<sub>2</sub>, é mais rapidamente letal para algumas espécies de insetos do que atmosferas com 100% de CO<sub>2</sub>. LINDGREN e VINCENT (1970) verificaram que atmosferas contendo 80% de CO<sub>2</sub>, 4% de O<sub>2</sub> e 16% de N<sub>2</sub> eram mais eficientes no controle de *Sitophilus* sp. que o CO<sub>2</sub> puro. Monro, citado por SEMPLE et al. (1992), afirmou que o dióxido de carbono puro é menos letal do que misturado com o oxigênio, porque ele atua quase instantaneamente, como um narcótico. Sob sua influência, o *Sitophilus* sp. permanece em estado de narcose, sem perder o poder de recuperação.

#### **2.3.3.1. Ação do Dióxido de Carbono sobre os Grãos**

BOND e MILLER (1988) e BANKS (1984) comentaram que a redução substancial da concentração de oxigênio possui o potencial para matar as pragas comumente encontradas nos produtos armazenados, além de reduzir outras atividades biológicas, como a respiração dos grãos e a sua degradação oxidativa. Contudo, atmosferas que possuem significativos conteúdos de oxigênio e altas concentrações de dióxido de carbono agem apenas como gases tóxicos. Esses autores observaram ainda que é pouco provável que esses gases possuam qualquer outro efeito direto na preservação da qualidade do produto, embora a longo prazo reduzam a infestação por

insetos. Entretanto, Munzing, citado por WHITE e JAYAS (1991), verificou que elevadas concentrações de dióxido de carbono podem afetar a qualidade de cozimento de massas preparadas com farinha de trigo.

De acordo com Mitsuda et al., citados por MANN et al. (1999), sementes absorvem CO<sub>2</sub> quando expostas a altas concentrações, mas a dessorção é rapidamente completada quando elas são expostas ao ar ambiente. Esta absorção de dióxido de carbono pelas sementes é significativa. Como consequência, segundo os autores, se uma quantidade adicional de dióxido de carbono não for adicionada ao sistema para compensar esta absorção, a concentração requerida deste pode não ser alcançada, resultando possivelmente em insetos sobreviventes.

COFIE-AGBLOR et al. (1998) afirmaram que, embora a quantidade exata de dióxido de carbono absorvida pelos grãos não seja conhecida, a sua absorção até o equilíbrio é dependente da temperatura e da concentração inicial de CO<sub>2</sub>.

Ainda em relação ao tratamento com dióxido de carbono em sementes, WHITE et al. (1990) afirmaram que elevados níveis deste gás não afetam a germinação e a qualidade da semente. Esse resultado foi confirmado por WHITE e JAYAS (1991), que, estudando o efeito do dióxido de carbono em concentrações que variaram entre 15 e 50% sobre diferentes insetos que infestam o trigo armazenado, concluíram que a percentagem de germinação do trigo não foi afetada pelo gás em todos os tratamentos, durante o período de 84 dias a que ficaram submetidas as amostras.

De acordo com MANN et al. (1999), o tratamento com dióxido de carbono é vantajoso, porque nenhum resíduo químico tóxico permanece nos grãos após a fumigação.

#### ***2.3.3.2. Ação do Dióxido de Carbono sobre os Insetos***

Os insetos que infestam os grãos armazenados são capazes de viver em umidades relativas baixas, tendo os espiráculos em sua estrutura e fisiologia, os quais permitem trocas rápidas de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub>, enquanto a perda de água é restringida pelo seu eficiente sistema respiratório. NICOLAS e SILLANS (1989) relataram que os efeitos gerais do gás CO<sub>2</sub> sobre os insetos são bem conhecidos, mas poucos trabalhos têm sido realizados sobre o modelo de ação do gás no inseto.

De acordo com CHOI et al. (1997), o dióxido de carbono é altamente permeável em tecido animal, 36 vezes mais permeável que o oxigênio à mesma temperatura e pressão e atua aumentando a respiração de alguns insetos, acelerando a anoxia pelo aumento do metabolismo; concentrações maiores que 5% de CO<sub>2</sub> causam a abertura do espiráculo, levando a perda de água, dessecação (dependendo das condições ambientais) e morte do inseto. Além desses efeitos, estes autores relatam que insetos expostos a uma alta concentração de CO<sub>2</sub> por curto período de tempo apresentam imobilização inicial, devido ao efeito anestésico do gás.

Chapman, citado por CHOI et al. (1997), afirmou que, em uma alta concentração externa de CO<sub>2</sub>, os tecidos dos insetos começam rapidamente a saturar com este gás. Esses efeitos da alta concentração sobre os tecidos são desconhecidos, mas a saturação é rapidamente revertida, quando da redução da concentração externa de CO<sub>2</sub>.

Os efeitos da baixa concentração de oxigênio e da alta concentração de dióxido de carbono sobre a mortalidade dos insetos foram demonstrados por BAILEY (1955, 1957, 1965) e KRISHNAMURTY et al. (1986). Para o primeiro pesquisador, uma atmosfera contendo no máximo 2% de O<sub>2</sub> e de 40% de CO<sub>2</sub> é indicada para se obter 100% de mortalidade dos insetos que infestam os grãos armazenados.

CALDERON e NAVARRO (1979) expuseram adultos de *Tribolium castaneum* a atmosferas contendo concentrações de 2 a 5% de oxigênio e de 5 a 35% de dióxido de carbono, por períodos de 24 a 120 h, em ambiente com umidade relativa de 57% e temperatura variando de 26 a 30°C. Concluíram haver claro efeito sinérgico entre o dióxido de carbono e o oxigênio, visto que a mortalidade, para determinadas concentrações de oxigênio, foi maior quando o nível de dióxido de carbono foi aumentado. A mortalidade também foi maior em temperatura mais elevada e para períodos de exposição mais longos. Posteriormente, CALDERON e NAVARRO (1980) confirmaram essas conclusões ao encontrarem interação significativa entre os níveis de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> e o período de exposição, na eficácia em adultos de *T. castaneum* e *Rhyzoperta dominica* (F.), os quais se apresentaram mais suscetíveis, com 100% de mortalidade na atmosfera de 2% de O<sub>2</sub> com a adição de apenas 10% de CO<sub>2</sub>.

MUELLER (1994) afirmou que há diferentes meios de produzir estresse nos insetos, incluindo decréscimo na concentração de oxigênio, aumento no nível de dióxido

de carbono e aumento da temperatura. De acordo com esse autor, a respiração do inseto pode ser aumentada em até 50% em função do aumento no nível de dióxido de carbono de 0 para 3% e em até 300% quando o nível de dióxido de carbono é elevado de 0 para 5%. Afirmou, ainda, que a concentração de fosfina pode ser reduzida em mais de 50% da concentração recomendada quando ela é utilizada em combinação com o dióxido de carbono para tratamento de desinfestação de pragas em grãos armazenados. LOCATELLI e DAOLIO (1993) citaram ainda, como agente acelerador da eficácia da atmosfera de CO<sub>2</sub>, a pressão a que está submetido o gás durante o tratamento.

O problema mais preocupante do armazenamento em atmosfera modificada/controlada é o desenvolvimento de resistência, visto que os insetos de grãos armazenados possuem potencial genético para desenvolver resistência, embora nenhuma tendência hereditária tenha exibido esta habilidade (BOND e BUCKLAND, 1979). Em experimento relacionado ao desenvolvimento de resistência adquirida ao dióxido de carbono pelos insetos, ANNIS e DOWSETT (1995), investigando a fase de pupa do *S. oryzae* em mais de 15 seleções, sob exposição requerida para desinfestação, verificaram não haver diferenças significativas na concentração requerida no início do experimento.

A ação tóxica de uma atmosfera rica em dióxido de carbono sobre as pragas de grãos armazenados é, segundo SEMPLE et al. (1992), independente da concentração do CO<sub>2</sub> quando esta é superior a 60%, enquanto em concentrações entre 60 e 35% algumas espécies são capazes de sobreviver ou são tolerantes aos níveis abaixo de 35%. Entretanto, esses autores afirmaram que a taxa de reprodução é bastante reduzida em concentrações próximas de 10% de CO<sub>2</sub> no ar.

Jay, citado por SEMPLE et al. (1992), constatou que a atmosfera com 60% de CO<sub>2</sub> é mais efetiva contra pragas primárias, como *Sitophilus* sp., *R. dominica* e *T. granarium*, enquanto atmosfera contendo 100% de CO<sub>2</sub> é mais efetiva contra pragas secundárias, como o *T. castaneum* e *Oryzaephilus surinamensis*, possivelmente por causa da adsorção e dessorção do CO<sub>2</sub> no grão. Este autor concluiu que a inferência prática é que diferentes misturas gasosas podem ser usadas, dependendo das espécies presentes no produto armazenado.

Uma comparação direta dos resultados encontrados por diferentes pesquisadores é bastante difícil de se conseguir, considerando que a mortalidade dos

insetos depende das condições de temperatura e umidade relativa do ar intersticial na massa de grãos, das composições gasosas e das espécies de insetos. Além disso, os efeitos da atmosfera controlada sobre as formas de ovos, larvas e pupas são também variáveis e constituem objeto de muitos estudos.

### **2.3.3.3. Ação do Dióxido de Carbono sobre os Microrganismos**

De acordo com SEMPLE et al. (1992), os fungos podem se desenvolver em concentrações de oxigênio de até 0,2% (são microaeróbios), enquanto leveduras (anaeróbios) podem proliferar rapidamente em uma concentração de oxigênio entre 0,5 e 1,0% em temperaturas adequadas, causando a fermentação do produto armazenado.

Landers et al. e Diener e Davis, citados por PITT (1995), afirmaram que o decréscimo da concentração de O<sub>2</sub> e o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> inibem o desenvolvimento de fungos e a produção da aflatoxina, porém a produção de aflatoxina é mais sensível em alta concentração de CO<sub>2</sub> do que o desenvolvimento de bolor. PITT (1995) confirmou os resultados obtidos pelos pesquisadores, porém verificou que o desenvolvimento do *A. flavus* não foi afetado substancialmente pelo decréscimo do nível de oxigênio até 5%; contudo, a produção de aflatoxina decresceu continuamente com o decréscimo de oxigênio até o nível de 1%. Em relação à concentração de dióxido de carbono, verificou que tanto o desenvolvimento do *A. flavus* como a produção de aflatoxina declinaram com o aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, mas a produção da toxina foi mais sensível que o desenvolvimento do fungo. O pesquisador concluiu que as taxas de desenvolvimento do *A. flavus* e de produção de aflatoxina foram independentes da concentração de O<sub>2</sub> e que a taxa de desenvolvimento declina linearmente com o aumento da concentração de CO<sub>2</sub>, segundo a relação:

$$f_{CO_2} = 1 - 0,00951 \times C_{CO_2} \quad \text{para } 0 \leq CO_2 \leq 100\%$$

em que

$f_{CO_2}$ : taxa relativa de crescimento afetada pela concentração de CO<sub>2</sub>; e  
 $C_{CO_2}$ : concentração de CO<sub>2</sub>, %.

CHRISTENSEN (1978) citou algumas vantagens do armazenamento em atmosfera controlada, como a inibição de produção de fungos aeróbios, a prevenção de produção de micotoxinas e a conservação dos fatores desejáveis à qualidade do produto;

como uma das desvantagens este autor mencionou a eliminação de populações de microrganismos que competem sob condições aeróbias.

#### ***2.3.3.4. Ação do Dióxido de Carbono sobre o Ser Humano***

De acordo com a ENGELHARD SENSOR TECHNOLOGIES (1999), um alto nível na concentração de dióxido de carbono, acima de 1.200 ppm, indica um ambiente pobremente ventilado para o ser humano. Os sintomas típicos nos indivíduos presentes em ambientes com alta concentração de CO<sub>2</sub> são a irritabilidade geral e sonolência, até reações físicas graves, causando "stress" e enfermidade. Portanto, conforme comentou MUELLER (1994), o dióxido de carbono pode ser mortal e precisa ser tratado como um fumigante químico, similar ao brometo de metila e à fosfina.

SEMPLE et al. (1992) mencionaram que uma atmosfera contendo menos de 14% de oxigênio e mais de 5% de dióxido de carbono pode ser perigosa para a vida humana. A rapidez do início dos sintomas pode variar com indivíduos, mas começa com o aumento da taxa de respiração. A morte do indivíduo acontece de 20 a 30 min em exposição, mas se este for removido para o ar ambiente, mesmo após breve exposição a altas concentrações de CO<sub>2</sub> (70%), nenhum dano fisiológico irreversível é verificado. Ainda segundo os autores, se o nível de O<sub>2</sub> for superior a 18% e o de CO<sub>2</sub> inferior a 0,5%, a célula armazenadora pode ser declarada segura para a entrada de indivíduos.

A atuação do dióxido de carbono é um importante fator na discussão do efeito estufa e aquecimento global terrestre. De acordo com REICHMUTH (1990), mesmo utilizando o dióxido de carbono, um completo eco-balanço tem que ser realizado para definir o efeito total desse gás sobre o ecossistema. Por outro lado, a quantidade de dióxido de carbono utilizado no controle de pragas é marginal, comparada com a produção industrial, emissão pelos motores de combustão, respiração, etc.

#### ***2.3.3.5. Ação do Dióxido de Carbono sobre a Estrutura Armazenadora***

Segundo BANKS (1984), há diversos problemas a serem pesquisados relacionados à adoção das técnicas de armazenamento em atmosfera modificada. Um desses problemas é determinar se o dióxido de carbono é prejudicial à resistência estrutural das células de concreto armado, promovendo a oxidação do aço pela carbonatação do concreto.

#### 2.3.4. Combinação Dióxido de Carbono e Fosfina

MUELLER (1994) mencionou que a fumigação com gás inerte e brometo de metila tem sido usada desde 1929, quando o entomologista de produtos armazenados R. T. Cotton patenteou o método de combinação. Em 1979, os israelenses patentearam o método de utilização de quatro partes de dióxido de carbono com uma parte de brometo de metila em grãos armazenados. Recentemente, os australianos têm realizado experimentos com a utilização de dióxido de carbono combinado com fosfina sobre os produtos armazenados em estruturas herméticas.

CASELLA (1998) utilizou uma mistura gasosa composta de 21% de CO<sub>2</sub> e 79% de N<sub>2</sub> associada a níveis reduzidos de fosfina (0,25, 0,50 e 0,75 g m<sup>-3</sup>) para estudar o seu efeito em milho infestado com todas as fases de desenvolvimento do *S. zeamais*, expostos a 27°C durante três períodos de tempo (24, 72 e 120 h). O controle efetivo de todas as fases de desenvolvimento do inseto foi obtido com as dosagens de 0,50 e 0,75 g m<sup>-3</sup> de fosfina associada à mistura gasosa no período de exposição de 120 h, e essas combinações gasosas influenciaram o fator germinação do milho.

COELHO (1999) trabalhou com atmosfera de 100% de CO<sub>2</sub> associada a três doses de fosfina (0,25, 0,50 e 0,75 g.m<sup>-3</sup>) no controle de diferentes fases de desenvolvimento dos insetos *S. zeamais* e *T. castaneum* e concluiu que, em geral, o aumento do período de exposição resultou no aumento da eficácia dos tratamentos em todas as fases de desenvolvimento dos insetos e que a concentração de 0,75 g.m<sup>-3</sup> no período de 120 h de exposição é a mínima necessária para o controle.

Na Alemanha, têm-se utilizado 3 g de fosfina e 200 g de dióxido de carbono por tonelada de grão, em silos de grandes profundidades, com o objetivo de reduzir a dosagem formal do fumigante, tornando o custo do tratamento mais barato e, além disso, diminuindo o tempo de exposição para aproximadamente uma semana. Nessa combinação, o dióxido de carbono é utilizado com a finalidade de transportar mais rapidamente a fosfina do topo para o fundo do silo, distribuindo-a em toda a massa de grãos, tendo um custo marginal adicional para o CO<sub>2</sub> (REICHMUTH, 1990).

MUELLER (1994) trabalhou com uma combinação de baixos níveis de fosfina, em torno de 0,23 g.m<sup>-3</sup>, com concentração de CO<sub>2</sub> variando de 4 a 6% e temperatura na faixa de 32 a 37°C. Ele utilizou em seus experimentos *S. oryzae* em vários

estágios de desenvolvimento. Para o controle eficaz de adultos de *S. oryzae*, um período de exposição de 12 h foi suficiente, e para o restante das fases (ovos, larvas e pupas) o controle eficaz foi obtido no período de exposição de 24 h.

DESMARCHELIER e WOHLGEMUTH (1984), trabalhando com todos os estágios de *S. oryzae* e *S. granarius* em uma atmosfera de 75% de CO<sub>2</sub> e 25% de ar (19°C e 70% UR), acrescida de fosfina, concluíram que a adição do dióxido de carbono acelerou a velocidade de ação da fosfina.

## 2.4. Tratamentos Químicos

### 2.4.1. Fosfina

Fosfina (PH<sub>3</sub>) é o fumigante comumente disponível para utilização no controle de pragas de produtos agrícolas armazenados, sendo freqüentemente fornecido em preparação sólida de fosfeto de alumínio ou de magnésio. A liberação da fosfina de preparações sólidas pode levar até cinco dias, dependendo das condições climáticas. Tipicamente, o período específico de fumigação é de 5 a 21 dias, seguidos de 2 a 5 dias de ventilação, com um período de 2 dias de carência. De acordo com ANNIS (1998), sob condições específicas, o tempo de 9 a 27 dias garante que a preparação sólida de fosfeto tenha finalizado a liberação do gás fosfina e que todo o gás tenha sido dissipado do grão. Ainda de acordo com o pesquisador, para fumigação com fosfina há a percepção de que o aumento de sua concentração acima da dosagem recomendada acarretará rápida desinfestação da massa de grãos. Isto é errôneo, pois, além de aumentar o risco de resíduos excessivos do fumigante, a fosfina poderá não matar todos os insetos presentes na massa de grãos, porque negligencia o fator tempo para a efetividade da fosfina.

Segundo MUELLER (1994), uma característica negativa da fosfina é o fato de que, sob certas condições, ela poderá causar corrosão de metais preciosos e cobre. Alguns itens, quando possível, precisam ser removidos do armazém quando da fumigação do produto armazenado. A fosfina produzida do fosfeto de magnésio ou do fosfeto de alumínio poderá gerar o ácido fosfórico, que poderá combinar com a umidade disponível, formando um ácido brando que se deposita sobre metais, oxidando-os. O manejo da corrosão é necessário quando a fosfina é utilizada em fumigação do armazém que contém circuitos impressos e equipamentos sensíveis.

#### 2.4.2. Brometo de Metila

O brometo de metila apresenta várias vantagens em relação aos outros fumigantes, como ação rápida sobre os insetos (24 h ou menos), é barato e causa o mínimo de dano à estrutura de armazenagem. Embora seja um penetrador um pouco menos agressivo que a fosfina, o brometo de metila sempre mata eficientemente as pragas (MUELLER, 1994).

Este fumigante tem sido identificado como um sério depletor da camada de ozônio, com um Potencial de Depleção do Ozônio (PDO) de 0,7. O *Clean Air Act* dos EUA declara que um produto com um PDO de 0,2 ou mais poderá ser eliminado em merecida causa.

De acordo com WELLER (1997), o Protocolo de Montreal, assinado por mais de 120 países em 1992, recomendou a redução no uso do brometo de metila para 50% em relação ao nível de utilização de 1991, para todos os países desenvolvidos, até o ano de 2005, e o completo abandono do uso até 2010.

### 2.5. Hermeticidade da Estrutura

Armazenagem em atmosfera modificada/controlada com elevados níveis de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) ou baixo nível de oxigênio (O<sub>2</sub>) é um método alternativo para controle de pragas em grãos armazenados, livre de resíduos tóxicos. Nestes métodos alternativos, a composição gasosa é alterada injetando-se gás dióxido de carbono para gerar uma atmosfera rica em CO<sub>2</sub> ou injetando nitrogênio para gerar uma atmosfera pobre em oxigênio e que seja letal para as pragas. Para o sucesso no controle das pragas, os gases deverão ser introduzidos à temperatura e umidade relativa adequadas ao grão, necessitando ser uniformemente distribuídos na massa de grãos e mantido em adequada concentração por um determinado período de exposição (ALAGUSUNDARAM et al., 1995).

A distribuição uniforme dos gases introduzidos no interior da massa de grãos depende da taxa de difusão dos gases através da massa de grãos (JAYAS et al., 1988), da corrente convectiva causada pelo gradiente de temperatura na massa de grãos (NAVARRO et al., 1986), da força da gravidade atuando sobre as moléculas dos gases

(ALAGUSUNDARAM et al., 1995) e da pressão na qual os gases são introduzidos na célula armazenadora (ALAGUSUNDARAM et al., 1996b).

É importante o conhecimento da distribuição e manutenção dos gases introduzidos na massa de grãos para um eficiente projeto e manejo, a um custo efetivo, dos sistemas de armazenagem em atmosfera modificada/controlada. De acordo com ALAGUSUNDARAM et al. (1996a), os modelos matemáticos baseados nos princípios físicos e validados com dados experimentais limitados são usados como ferramentas para estudar a distribuição e manutenção dos gases em um silo para grãos. Afirmaram que há necessidade de incorporar nos modelos matemáticos o efeito da gravidade sobre a distribuição do dióxido de carbono no interior da massa de grãos.

JAYAS et al. (1988) utilizaram um modelo baseado no método de elementos finitos para prever a concentração de  $\text{CO}_2$  na massa de grãos e verificaram que ele superestimava os valores lidos experimentalmente. Concluíram que o modelo poderia ser melhorado, incluindo equações que simulassem um escapamento do gás através da parede do silo, a sorção do gás pelo grão ou a produção desse gás em várias localizações por bolsas de grãos deteriorados, microflora e insetos, tornando o movimento do  $\text{CO}_2$  na massa de grãos um problema tridimensional.

JAY (1980) relatou que, em uma célula não-hermética, as moléculas pesadas de  $\text{CO}_2$  se movimentam rapidamente do topo da célula para o fundo, e este movimento descendente tem sido utilizado efetivamente para distribuir fumigantes em silos.

Para obter alto nível de retenção do gás, as estruturas de armazenamento precisam ser bem herméticas. A vedação das células da maioria das estruturas de armazenagem com objetivo de as tornarem herméticas não é uma tarefa fácil de ser realizada. Segundo ELLIS (1984), o controle eficaz de pragas utilizando-se de ambientes totalmente herméticos pode ou não tornar-se uma alternativa economicamente viável para o armazenamento em condições de reduzidas concentrações de oxigênio. Construir ou adaptar grandes estruturas de armazenamento para transformá-las em ambientes herméticos pode se tornar economicamente oneroso, o que tornaria esta prática inviável para a conservação de grandes volumes de grãos. Contudo, os custos envolvidos nas modificações durante a construção da célula armazenadora são muito menores do que aqueles associados com as alterações de uma estrutura já existente.

BANKS e ANNIS (1980) mostraram que é técnica e economicamente viável a conversão de estruturas convencionais de armazenamento em unidades com elevado grau de hermeticidade, visando o armazenamento em atmosfera modificada ou controlada. ALAGUSUNDARAM et al. (1995) afirmaram que o armazenamento aplicando estas técnicas poderá ser utilizado efetivamente e em larga escala no controle de pragas apenas se ela puder ser aplicada em células não-herméticas.

MANN et al. (1997) mencionaram que, nas fazendas, os produtos agrícolas são estocados em silos metálicos parafusados que podem ser vedados economicamente, para utilização das técnicas de armazenamento em atmosfera modificada ou em atmosfera controlada. MANN et al. (1999) mostraram que silos metálicos totalmente cheios podem ser vedados para um possível tratamento dos grãos com CO<sub>2</sub> no controle de pragas, sendo uma alternativa aos pesticidas sintéticos ou fumigantes. Em seu experimento, os silos vedados foram adequados para a fumigação com CO<sub>2</sub>, visto que eles conservaram aproximadamente 75% do CO<sub>2</sub> que foi inicialmente adicionado.

De acordo com REICHMUTH (1990), os pontos de vazamento das estruturas de armazenamento ocorrem normalmente em cinco possíveis aberturas do silo: abertura do cone de descarga; abertura do telhado, para enchimento do silo; abertura de acesso à inspeção no telhado; abertura de acesso à inspeção do piso; e abertura para conexão do duto de aeração. ALAGUSUNDARAM et al. (1995) citaram ainda como ponto de vazamento o piso de concreto e a junção deste com a parede metálica do silo. Ainda de acordo com esses últimos autores, para melhorar a retenção de CO<sub>2</sub> na célula de armazenamento, uma lâmina de PVC impermeável a gases pode ser estendida no piso e prendida na parede da célula.

## **2.6. Custo da Armazenagem em Atmosfera Modificada/Controlada**

O custo da alternativa de controle de pragas de grãos armazenados em silos, utilizando as técnicas de atmosfera modificada ou controlada, de acordo com REICHMUTH (1990), depende enormemente do grau de hermeticidade ao gás na estrutura a ser tratada. Na fumigação inicial para substituição do ar presente na célula de armazenamento, há necessidade de injetar um volume de gás correspondente ao volume da célula a ser tratada, visando retirar o ar residual. Isso é o que se tem verificado em

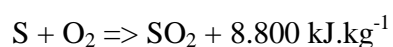
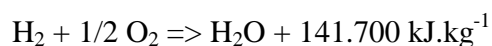
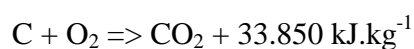
silos de células de concreto, onde nitrogênio resfriado ou dióxido de carbono é introduzido lentamente dentro da massa de grãos, no fundo, impedindo um fluxo turbulento do gás. Esse custo inicial, segundo o pesquisador, está na faixa de U\$0,27 por tonelada de produto. Dependendo principalmente da temperatura e da taxa de vazamento da célula a ser fumigada, os custos para tratamento efetivo variam de cerca de U\$1,59 por tonelada de produto, para uma taxa de vazamento igual a 50 litros por dia por tonelada, até U\$7,95, para uma situação de vazamento igual a 400 litros por dia por tonelada de produto, para uma temperatura do grão de 15°C. Ainda segundo o mesmo autor, para uma temperatura da massa de grãos de 20°C, o custo pode ser reduzido para menos de U\$1,06 por tonelada de produto e para cerca de U\$3,98 por tonelada, respectivamente, para taxas de vazamento iguais a 50 e 400 litros de gás por dia por tonelada de grãos. Estas situações não consideram o custo para vedação da célula de armazenagem, que é certamente alto quando os serviços são executados pela primeira vez. Glet, citado por REICHMUTH (1990), afirmou que o custo de vedação pode ser calculado para muitos anos, pelo fato de a vedação geral inicial manter-se por um período prolongado de tempo.

BANKS e ANNIS (1980) ressaltaram que o controle de pragas em grãos armazenados utilizando as técnicas de atmosfera modificada/controlada deve se basear no Nível de Dano Econômico (NDE), a fim de que o custo de sua adoção não seja superior ao prejuízo provocado pela praga.

Segundo NOYES (199-), os futuros sistemas de armazenamento de produtos agrícolas que utilizarão as técnicas de atmosfera modificada ou controlada deverão ser projetados e desenvolvidos a custo compatível com o dos atuais sistemas de armazenagem.

## 2.7. Subsídios Teóricos para Dimensionamento de Geradores de CO<sub>2</sub>

A maioria dos combustíveis contém carbono, hidrogênio e, algumas vezes, enxofre. Com simplificações, pode-se dizer que a combustão consiste nas seguintes reações químicas:



Para liberação máxima de energia térmica e de dióxido de carbono, é necessário converter os elementos oxidáveis em substâncias ou compostos que não sejam mais oxidáveis. Quando isso acontece, diz-se que a combustão é completa. Para avaliar a qualidade do combustível e seu processo de queima, torna-se necessário o conhecimento de sua composição química, ou seja, da percentagem em massa de seus constituintes. De acordo com CETEC (1988), a composição do carvão vegetal é dependente da temperatura de carbonização, sendo os valores médios em peso de 74,5% de carbono, 3,0% de hidrogênio, 17,0% de oxigênio, 0,5% de enxofre, 1,0% de nitrogênio e 4,0% de cinzas.

O poder calorífico inferior (PCI) pode ser determinado conhecendo-se a composição química do combustível, as reações de combustão e o calor liberado em cada reação, de acordo com a Equação 1 (CETEC, 1988).

$$PCI = 33.850 * \frac{C}{100} + 141.700 * \left( \frac{H}{100} - \frac{O}{8 * 100} \right) + 8.800 * \frac{S}{100} - 2.500 * \left( \frac{W}{100} + \frac{9 * H}{100} \right) \quad \text{Eq. 1}$$

em que

- PCI: poder calorífico inferior do combustível,  $\text{kJ.kg}^{-1}$ ;
- C: quantidade de carbono presente no combustível, % massa;
- H: quantidade de hidrogênio presente no combustível, % massa;
- O: quantidade de oxigênio presente no combustível, % massa;
- S: quantidade de enxofre presente no combustível, % massa; e
- W: teor de umidade do combustível, % b.s..

Para o dimensionamento de equipamentos de queima e de controle da combustão, é necessário o conhecimento da taxa de alimentação de ar de combustão e das características dos gases gerados. Os volumes estequiométricos de oxigênio e de ar atmosférico necessário para queimar 1 kg de combustível são representados, respectivamente, pelas Equações 2 e 3 (CETEC, 1988).

$$V'_{O_2} = 1,87 * \frac{C}{100} + 5,6 * \left( \frac{H}{100} - \frac{O}{8 * 100} \right) + 0,7 * \frac{S}{100} \quad \text{Eq. 2}$$

$$V'_{Ar} = \frac{100}{21} * V'_{O_2} \quad \text{Eq. 3}$$

em que

- $V'_{O_2}$ : volume estequiométrico de oxigênio,  $\text{Nm}^3.\text{kg}^{-1}$  de combustível; e
- $V'_{Ar}$ : volume estequiométrico de ar atmosférico,  $\text{Nm}^3.\text{kg}^{-1}$  de combustível.

O volume dos gases gerados na combustão, a partir da reação do combustível com o ar atmosférico, é dado pela Equação 4 (CORTEZ, 1997).

$$V_g^t = 1,87 * \frac{C}{100} + 0,7 * \frac{S}{100} + 11,2 * \frac{H}{100} + 1,24 * \frac{w}{100} + 0,8 * \frac{N}{100} + 0,78 * V_{Ar}^t \quad \text{Eq. 4}$$

em que

$V_g^t$  : volume de gases gerados na combustão,  $Nm^3.kg^{-1}$  de combustível; e

$0,78 * V_{Ar}^t$  : representa o nitrogênio do ar estequiométrico.

O volume de oxigênio presente no espaço intergranular de uma massa de grãos armazenada no silo é dado pela Equação 5.

$$V_{O_2}^s = \frac{21}{100} * V_{ArS} \quad \text{Eq. 5}$$

em que

$V_{O_2}^s$  : volume de oxigênio intergranular no silo,  $Nm^3$ ; e

$V_{ArS}$  : volume de ar intergranular no silo,  $Nm^3$ .

$$V_{ArS} = V_s * \epsilon$$

$V_s$  : volume do silo armazenador,  $m^3$ ; e

$\epsilon$ : porosidade da massa de grãos armazenada na célula, decimal.

Para determinação do volume de ar intergranular no interior do silo, é necessário determinar o volume de grãos armazenados ou a capacidade volumétrica da célula armazenadora. A determinação volumétrica de um silo cilíndrico armazenador é dada pela Equação 6.

$$V_s = \frac{\pi * D^2}{4} * H + \frac{\pi * D^3}{24} * tg(\alpha) + \frac{\pi * D^3}{24} * tg(\beta) \quad \text{Eq. 6}$$

em que

D: diâmetro do silo cilíndrico, m;

H: altura do corpo cilíndrico do silo, m;

$\alpha$ : ângulo de repouso do produto, graus; e

$\beta$ : ângulo de inclinação do piso do silo, graus.

A quantidade estequiométrica de combustível necessário para queimar o oxigênio presente no silo é estimada pela Equação 7.

$$Q_{comb} = \frac{V_{O_2}^s}{V_{O_2}^i} \quad \text{Eq. 7}$$

em que  $Q_{comb}$  é a quantidade estequiométrica de combustível em kg de combustível.

A quantidade estequiométrica de ar atmosférico para queimar o oxigênio presente no espaço intergranular de uma massa de grãos estocada em um silo é dada pela Equação 8.

$$Q_{Ar} = V_{Ar}^i * Q_{comb} \quad \text{Eq. 8}$$

em que  $Q_{Ar}$  é a quantidade estequiométrica de ar para queimar o oxigênio, em  $\text{Nm}^3$ .

A taxa de volumétrica de dióxido de carbono gerada e a taxa mássica de água que deverá ser retirada do sistema durante a queima estequiométrica do combustível são dadas, respectivamente, pelas Equações 9 e 10.

$$TF_{CO_2} = \frac{C}{100} * 112,2 * TQ_{comb} \quad \text{Eq. 9}$$

$$TF_{H_2O} = \frac{H}{100} * 540 * TQ_{comb} \quad \text{Eq.10}$$

em que

$TF_{CO_2}$  : taxa de formação de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ;

$TF_{H_2O}$  : taxa de formação de água,  $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; e

$TQ_{comb}$  : taxa de queima do combustível,  $\text{kg} \cdot \text{h}^{-1}$ .

$$TQ_{comb} = \frac{F_{Ar}}{V_{Ar}^i} * 0,6 * Ef$$

$F_{Ar}$  : vazão de ar do circuito fechado de queima,  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ ; e

$Ef$  : eficiência de queima da fornalha, %.

### 3 - MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado na Área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Construiu-se um protótipo (equipamento Gerador de CO<sub>2</sub>) com o objetivo de maximizar a produção de dióxido de carbono, que foi acoplado a um silo cilíndrico com capacidade estática de aproximadamente 38 t de milho (volume de 45,0 m<sup>3</sup>), capacidade normalmente encontrada nas pequenas propriedades agrícolas.

#### 3.1. Preparo do Silo Experimental

Para a realização do experimento utilizou-se um silo cuja estrutura foi construída integralmente em ferro-cimento, com o piso inclinado e sem dutos de aeração. Inicialmente, o teto do silo recebeu um reforço de concreto na espessura de 50 mm, pelo fato de apresentar pequenas fissuras, e um beiral de 30 cm, pois o projeto original não o contemplava. Na Figura 1 são mostradas as dimensões do silo de ferro-cimento utilizado no experimento.

##### 3.1.1. Dutos de Aeração

Foram instalados três dutos de aeração, utilizando tubos de PVC com comprimento de 1.900 mm e diâmetro de 100 mm, perfurados com furos circulares de diâmetro igual a 3 mm. Os dutos de aeração foram espaçados radialmente e fixados ao

piso, formando ângulos de  $0^\circ$ ,  $120^\circ$  e  $240^\circ$ . O sistema de descarga do silo foi modificado acoplando-se ao sistema uma peça metálica apropriada, a qual permitiu conectar os dutos de aeração ao ventilador do protótipo, propiciando a insuflação dos gases provenientes do protótipo na massa de grãos. A Figura 2 mostra os dutos de aeração montados sob o piso do silo.

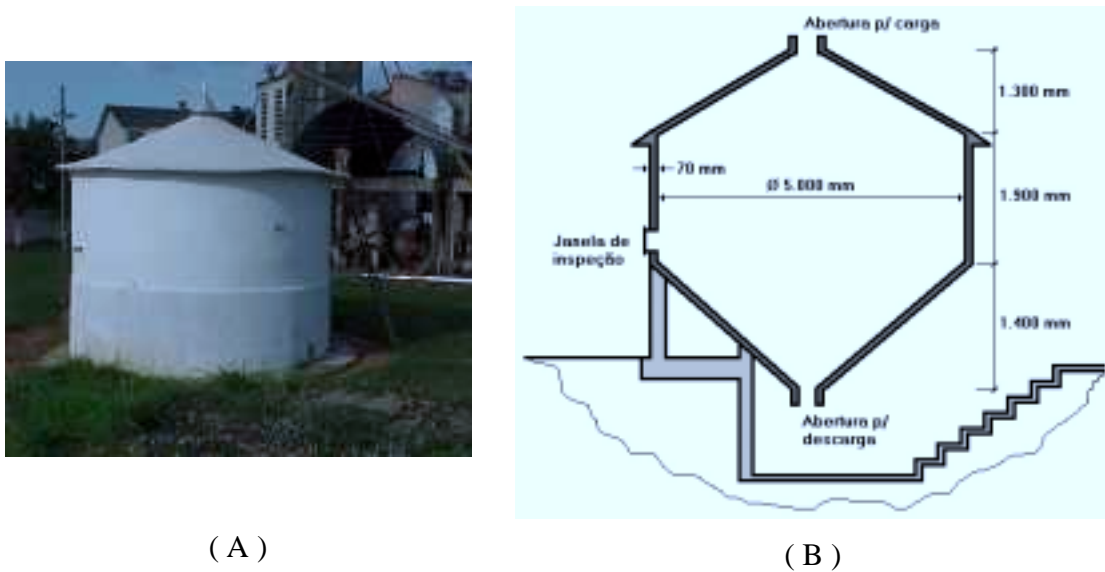


Figura 1 – Silo utilizado no experimento (A) e suas dimensões (B).



Figura 2 - Distribuição dos dutos de aeração montados no interior do silo experimental.

### *3.1.2. Vedação do silo*

Para proporcionar o máximo de hermeticidade, foi fundamental que a estrutura fosse vedada com a maior eficiência possível. Esse procedimento garante o mínimo de vazamento e possibilita o controle eficaz da concentração de O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> no interior da célula armazenadora durante períodos prolongados de tempo.

Há, em todas as estruturas de armazenamento, pontos que são considerados críticos em termos de vazamentos. Em silos de ferro-cimento, por exemplo, a permeabilidade da argamassa é um dos pontos críticos que necessitam de impermeabilização. Com este objetivo, o teto e o piso do silo foram impermeabilizados com uma camada de impermeabilizante SIKA<sup>®</sup> (impermeabilizante comercial indicado para pisos e coberturas). Outras áreas consideradas críticas foram as aberturas de acesso ao interior do silo e a abertura inferior para descarga de produto. Cada uma destas áreas foi vedada com massa de calafetar, uma vez que esta possui características como plasticidade, durabilidade, elevado grau de aderência e facilidade de aplicação. Externamente, o silo recebeu três camadas de tinta acrílica branca, indicada para pisos.

### *3.1.3. Instrumentação do silo*

Para monitoramento da temperatura e da concentração dos gases nos diferentes pontos no interior do silo, foram utilizados, respectivamente, fios de termopares do tipo cobre-constantan e tubos de cobre com diâmetro de 9,5 mm. No total, foram colocados no interior do silo 11 pontos para monitoramento de temperatura e 11 para monitoramento das concentrações de gases. Ambos os sensores foram distribuídos no interior do silo nos sentidos radial, distanciados a partir do centro do silo em 0, 1.100 e 2.200 mm, e vertical, no centro do silo, nos níveis de alturas de 400, 1.200, 2.000 e 2.800 mm em relação à abertura de descarga do silo. Portanto, os sensores foram distribuídos radialmente, com três sensores em cada nível de altura, e no primeiro nível, devido à inclinação do piso, foram colocados apenas dois sensores, perfazendo o total de 11 sensores. A parede do silo foi perfurada, para permitir a passagem dos terminais dos termopares e dos tubos de cobre para o exterior do silo, e na junção do tubo com a parede do silo foi utilizada massa Durepox<sup>®</sup>, com a finalidade de não permitir o escapamento de gases.

Para afixar os fios termopares e os tubos de cobre no interior do silo, uma estrutura de ferro "metalon" foi montada, com capacidade para suportar as pressões devido à carga do produto, mantendo os sensores nos referidos locais de amostragem. Esta estrutura tinha distribuição radial, com ângulos de  $60^\circ$ ,  $180^\circ$  e  $300^\circ$  em relação aos dutos de aeração, ou seja, os sensores foram instalados na bissetriz do ângulo formado pelos dutos de aeração. A Figura 3 mostra o esquema de distribuição dos sensores nos diferentes pontos de amostragem no interior do silo.

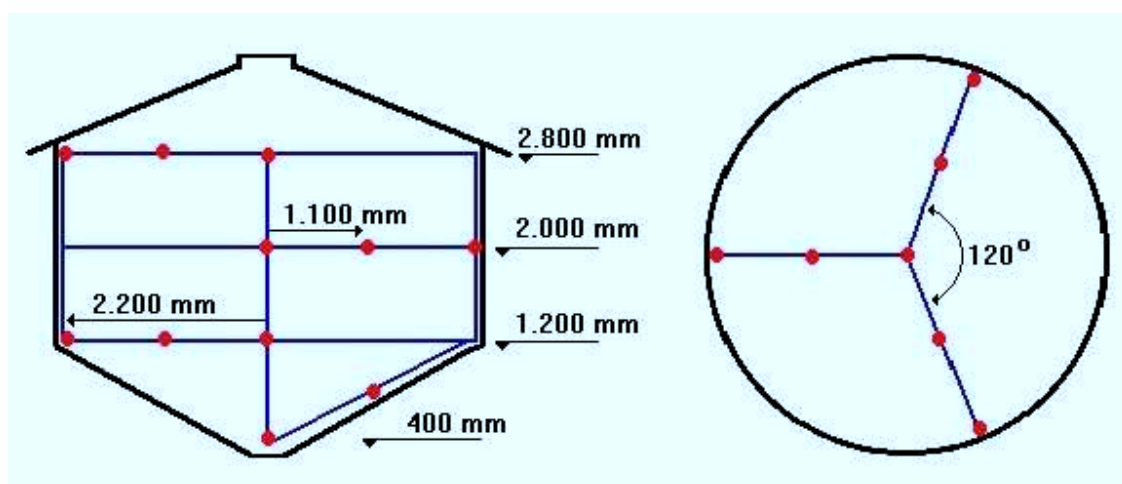


Figura 3 - Distribuição dos sensores de monitoramento da temperatura e da concentração dos gases no interior do silo.

Para a amostragem do produto no interior do silo, foram utilizados adaptadores de PVC com flanges e anéis de vedação, com diâmetros de 60 mm. Estes adaptadores foram distribuídos ao longo da parede do silo radialmente, em ângulos de  $90^\circ$ , e verticalmente, em alturas de 0, 480 e 960 mm, a partir da junção do piso inclinado com a parede do silo. Para amostragem do produto no cone de descarga, um adaptador foi colocado, de acordo com ângulo de inclinação do piso, na junção deste com a parede do silo. Portanto, a amostragem do produto no silo foi realizada em quatro posições ao longo da parede do silo. A Figura 4 mostra em detalhes o terminal do tubo de cobre e de um adaptador na parede do silo.

### 3.2. Protótipo (equipamento Gerador de CO<sub>2</sub>)

Foi construído um protótipo capaz de alterar o ar atmosférico intergranular do interior do silo experimental. O equipamento modificador de atmosfera foi projetado e construído em função do volume de ar atmosférico intergranular presente no interior do silo, principalmente em relação à concentração de oxigênio presente no ar, e das condições adequadas de temperatura e umidade relativa do fluido de controle, necessárias ao armazenamento do produto. O protótipo é constituído, basicamente, de uma fornalha para combustão do carvão vegetal, um trocador de calor, um sistema de refrigeração e um ventilador (Figura 5). A Figura 6 mostra a seqüência dos componentes no equipamento Gerador de CO<sub>2</sub>.



(A)



(B)

Figura 4 – Detalhe externo dos terminais de amostragem do produto (A) e dos gases (B) fixados à parede do silo.



Figura 5 - Equipamento Gerador de CO<sub>2</sub> desenvolvido para realização do experimento.

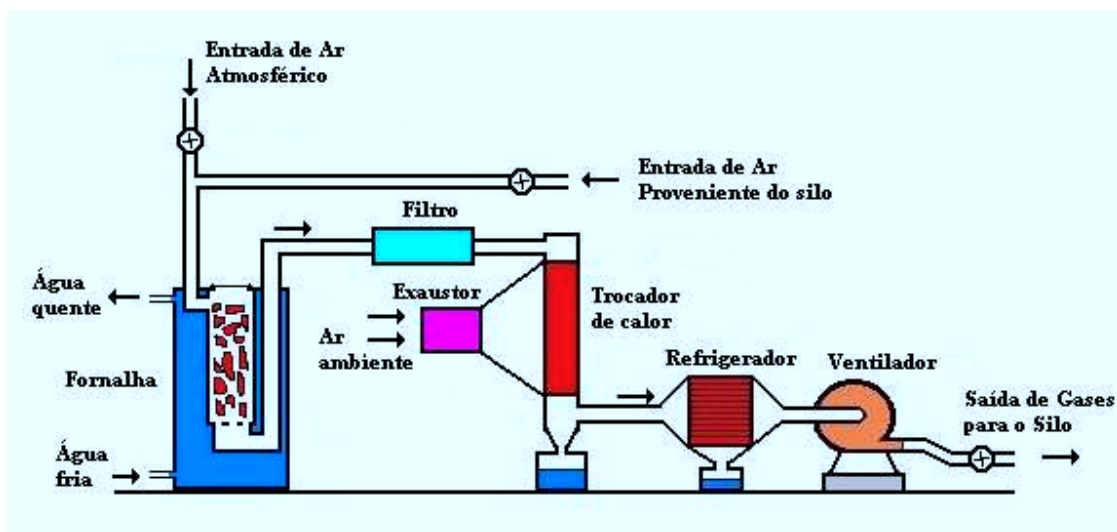


Figura 6 – Sequência dos componentes no equipamento Gerador de CO<sub>2</sub>.

### 3.2.1. Fornalha para a Queima do Carvão Vegetal

Foi construída uma fornalha em chapa metálica para queima de carvão vegetal, desenvolvida por SILVA (2000). A fornalha era constituída de uma câmara de combustão e de um depósito de carvão vegetal. Internamente, na câmara de combustão, havia uma grelha de formato cúbico que tinha como finalidade conter o carvão vegetal e permitir a passagem do ar comburente. Após testes preliminares, verificou-se que o ar comburente não passava necessariamente em sua totalidade pela grelha e que havia a necessidade de acrescentar um dispositivo no interior da câmara de combustão, com finalidade de melhorar o fluxo e a turbulência do comburente na região de combustão. Para isso, construiu-se um dispositivo canalizador dos gases que, acoplado à grelha, direcionava os gases da combustão e melhorava a turbulência e a disponibilidade de comburente na grelha. Acoplado à fornalha, um registro permitia a entrada e o controle do ar atmosférico para o interior da câmara de combustão. Além desse, a fornalha continha um outro registro para o controle da entrada dos gases provenientes do silo e um tubo metálico de saída com diâmetro de 100 mm, que conduzia os gases provenientes da combustão até o trocador de calor.

Testes preliminares detectaram a necessidade de alteração da fornalha original. Foi construída uma nova fornalha, também em chapa metálica, que contém uma câmara de combustão de tamanho maior que a primeira. Esta câmara de combustão foi

projetada com o propósito de conter o volume de carvão vegetal necessário para queimar a totalidade do oxigênio no interior do silo experimental. Além deste diferencial, garante-se que todo o comburente que entra na câmara de combustão atravessa somente a região de queima do combustível.

A câmara de combustão possui apenas uma entrada de ar, proveniente do meio externo, e uma saída de gases, proveniente da combustão. Externamente à fornalha, acoplada à entrada de ar, uma conexão em forma de T contém dois registros, os quais permitem o controle da entrada do ar atmosférico e dos gases provenientes do silo. As aberturas que permitem a colocação do combustível na câmara de combustão e a retirada das cinzas são totalmente fechadas com auxílio de juntas térmicas para motores de combustão, garantindo total controle da entrada do comburente na câmara de combustão. Devido à necessidade de resfriamento externo da fornalha, tendo em vista que o volume de combustível em combustão liberava grande quantidade de calor, foi definido um espaço preenchido com água corrente natural, entre a parede externa da fornalha e a câmara de combustão. Essa água entra continuamente no interior da fornalha durante o seu funcionamento, por meio de um registro localizado no fundo desta, e sai quente em um "ladrão" localizado na parte superior.

### *3.2.2. Trocador de Calor*

Os gases produzidos na câmara de combustão são canalizados em um tubo metálico de 75 mm de diâmetro e direcionados até o trocador de calor. O trocador de calor foi construído a partir de um radiador de aletas, componente responsável pelo arrefecimento de motores de veículos pesados e máquinas agrícolas, e de um ventilador axial (Figura 7). Os gases atravessam internamente o radiador através do interior de seus estreitos tubos de cobre, no sentido vertical, em fluxo descendente, trocando calor com o ar ambiente, que atravessa o radiador por entre suas aletas, insuflado pelo ventilador axial. Na parte inferior do radiador, uma peça metálica, em forma de moega, foi acoplada com a finalidade de captar a água condensada devido à diminuição de temperatura do vapor d'água provenientes da câmara de combustão e direcioná-la até um reservatório, garantindo a hermeticidade do sistema. A saída dos gases do trocador de calor localiza-se

na parte superior da moega, sendo estes conduzidos até o sistema de refrigeração por meio de um tubo metálico cujo diâmetro era igual a 100 mm.

### 3.2.3. Sistema de Refrigeração

Um sistema de refrigeração, composto de um condensador e um compressor, foi instalado no equipamento, com a finalidade de diminuir a umidade relativa dos gases provenientes da fornalha, visto que, durante o processo de combustão do carvão vegetal, o vapor d'água é liberado e misturado aos gases secos. O condensador constitui-se de um canal de estreita largura e longo comprimento, feito de aço inoxidável, que conduz internamente os gases, sendo banhado externamente, em toda a sua extensão, por um fluido refrigerante (álcool hidratado). O canal apresentava-se em forma de U invertido, e em cada extremidade há uma saída para a água condensada, sendo esta direcionada para o mesmo reservatório utilizado pelo trocador de calor.

Para manter o álcool em baixa temperatura, utilizou-se um compressor de “freezer” residencial, sendo que a serpentina de cobre, responsável pela retirada de calor do meio, fica totalmente submersa no álcool e circundando o canal. Um reservatório de dupla parede protege o álcool do meio ambiente, sendo a parede interna em aço inoxidável e a externa, em aço galvanizado. Entre as paredes do reservatório colocou-se



Radiador



Ventilador axial

Figura 7 – Componentes do trocador de calor utilizado no protótipo.

lã de vidro, para isolar termicamente o fluido refrigerante. A Figura 8 apresenta o esquema ilustrativo do sistema condensador de vapor d'água utilizado no protótipo.

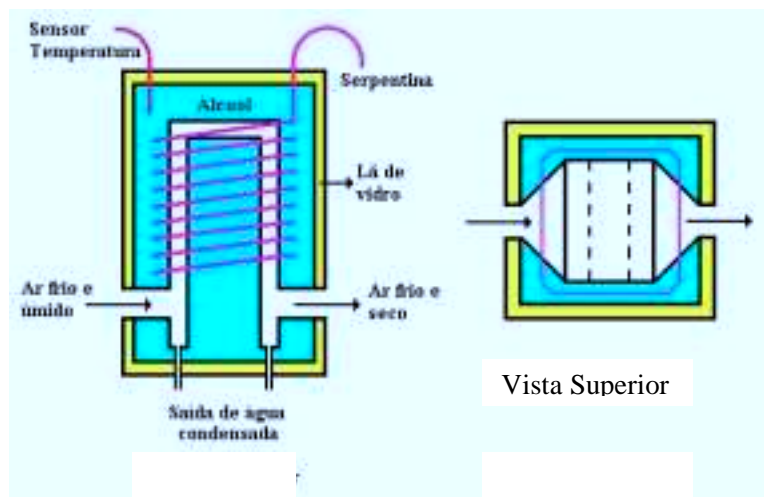


Figura 8 – Condensador de vapor d'água utilizado no protótipo.

#### 3.2.4. Ventilador Centrífugo

Imediatamente após o sistema de refrigeração há um ventilador centrífugo, com finalidade de movimentar os gases e de vencer as resistências impostas à sua passagem pelo interior dos componentes do protótipo, pelas tubulações e pela massa granular. No interior dos componentes do equipamento protótipo, os gases foram succionados (pressão negativa) e, a partir da saída, insuflados para o interior do silo, utilizando os dutos de aeração.

#### 3.2.5. Operação do Protótipo

Basicamente, a operação do equipamento Gerador de CO<sub>2</sub> inicia-se na câmara de combustão, com a queima do carvão vegetal, e, imediatamente após a estabilidade da combustão, fecha-se a abertura de alimentação do combustível no protótipo e aciona-se os sistemas de ventilação. Os gases produzidos na combustão, principalmente dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO) e vapor d'água, atravessam, na seqüência, o trocador de calor e o condensador. Após o condensador, os gases passam pelo ventilador, que os insuflava ao silo.

### 3.3. Instrumentação do Protótipo

Para monitoramento da temperatura nos diferentes pontos do equipamento Gerador de CO<sub>2</sub>, foram utilizados fios de termopares de "cobre-constantan". Estes sensores foram instalados nos tubos de entrada e de saída dos gases da fornalha, na entrada e na saída dos gases do trocador de calor, na saída do ar ambiente que atravessa o trocador de calor, nos tubos de entrada e de saída dos gases do condensador e no líquido refrigerante do condensador. No tubo de entrada dos gases no condensador e no tubo de saída dos gases do protótipo para o silo, foram instalados sensores de temperaturas de bulbo seco e de bulbo molhado. Para determinação da temperatura de bulbo molhado, foi utilizado um sensor, envolvido em sua extremidade por um tecido de algodão, o qual permanecia embebido em água destilada. Próximo ao protótipo foi instalado um sensor, para leitura da temperatura do ar ambiente.

No tubo de saída dos gases do protótipo, foi instalado um tubo de cobre com 9,5 mm de diâmetro que permitia a amostragem dos gases provenientes da combustão e que eram injetados no interior do silo. A Figura 9 mostra, em detalhe, o dispositivo para obtenção das amostras dos gases, o sensor de bulbo seco e o sensor de bulbo molhado, com o recipiente e o tecido de algodão embebido na água.



(A)



(B)

Figura 9 - Dispositivo para amostragem de gases e sensor de bulbo seco (A) e o sensor de bulbo molhado (B).

Devido ao tempo necessário para refrigeração e manutenção do álcool em baixa temperatura, foram instalados um "timer" e um termostato no circuito termo-elétrico do sistema de refrigeração (Figura 10). A finalidade do "timer" foi a de permitir o funcionamento do sistema de refrigeração antes do funcionamento do protótipo. Em testes

preliminares, concluiu-se que o tempo máximo necessário para reduzir a temperatura de 27°C para 10°C do álcool contido no condensador era de aproximadamente cinco horas. Dessa forma, o "timer" foi ajustado para ligar o sistema de refrigeração seis horas antes de seu funcionamento e desligá-lo 10 horas após o acionamento do sistema. O termostato tinha como função a manutenção da temperatura do álcool entre os limites de -10° C e -5° C. Abaixo do primeiro valor o sistema desligava e, acima do segundo, ligava, considerando o intervalo de tempo permitido pelo "timer".



(A)



(B)

Figura 10 - Detalhes do "timer" (A) e do termostato (B) montados no equipamento.

### 3.4. Carvão Vegetal

O combustível queimado na fornalha do protótipo, para gerar a atmosfera rica em dióxido de carbono, foi o carvão vegetal, originado da madeira do gênero *Eucalyptus*. A granulometria do carvão vegetal utilizado no experimento variou entre 8 cm<sup>3</sup> e 64 cm<sup>3</sup>. Foram coletadas amostras do carvão vegetal, para determinação do teor de umidade, das percentagens de carbono fixo, de materiais voláteis e de cinzas, de acordo com a norma ABNT (MB-15, adaptada das normas ASTM D 3172-73 a D 3175-73), da densidade aparente (D 167-73) e do poder calorífico (D 2015-77). Essas caracterizações foram realizadas no Laboratório de Energia da Madeira do Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa.

### 3.5. Testes Preliminares

Testes preliminares foram realizados antes do armazenamento do produto no silo, os quais tinham como objetivos determinar a frequência de operação do equipamento Gerador de CO<sub>2</sub>; verificar a troca gasosa entre o interior do silo e o meio ambiente (hermeticidade do silo) e as opções de manejo do sistema, visando maximizar a produção de CO<sub>2</sub>; e otimizar as condições psicrométricas ideais dos gases produzidos pelo protótipo, para manutenção da qualidade do produto armazenado.

Os testes preliminares foram realizados considerando dois procedimentos: operando o sistema com recirculação dos gases e sem a recirculação dos gases. No primeiro, os gases contidos no silo eram succionados pelo ventilador até a câmara de combustão, onde o combustível era queimado na presença do O<sub>2</sub>. Em seguida, os gases provenientes da combustão atravessavam os componentes do protótipo e eram insuflados para o interior do silo, fechando o ciclo. Dessa forma, há decréscimo da concentração de O<sub>2</sub> no interior do silo, decorrente da sua combustão. O segundo difere do primeiro pela sucção do ar ambiente em lugar do ar contido no silo. Neste caso, a entrada de ar ambiente no interior da câmara de combustão e a saída dos gases do interior do silo foram controladas por registros, e a abertura ou fechamento destes era feita em função da temperatura medida na saída da câmara de combustão. O aumento da concentração de CO<sub>2</sub> e o decréscimo da concentração de O<sub>2</sub> no interior do silo durante os testes sem recirculação dos gases foram obtidos por meio da constante troca dos gases em seu interior pelos gases provenientes do protótipo.

Em todos os testes preliminares, a abertura do registro que permitia a entrada dos gases provenientes da combustão para o interior do silo era feita após a obtenção da estabilidade da combustão, observada pela temperatura de saída dos gases da câmara de combustão. Nos testes com recirculação dos gases, simultaneamente, eram abertos os registros de entrada e de saída dos gases do silo e fechados os registros que permitiam a entrada do ar ambiente no interior da câmara de combustão e sua saída para o ar ambiente.

Em alguns testes, após o funcionamento do protótipo, foram monitorados os níveis de concentração do CO<sub>2</sub> e do O<sub>2</sub> no interior do silo experimental, em intervalos de 0, 24 e 48 h, com objetivo de verificar a hermeticidade do silo. O monitoramento foi realizado

nos pontos localizados no centro do silo, nos níveis de altura de 400, 1.200, 2.000 e 2.800 mm.

Antes de cada teste, fazia-se uma ventilação por um período mínimo de três horas do interior do silo com ar ambiente, utilizando-se os dutos de aeração e o ventilador do protótipo, garantindo, dessa forma, a completa troca do ar contido em seu interior.

### **3.6. Caracterização do Milho**

Após os testes preliminares, em que foram feitos os ajustes necessários no equipamento protótipo e se obteve o domínio do seu manejo operacional, foram colocadas no silo experimental aproximadamente 27 t de milho proveniente da região de Coimbra - MG, colhido mecanicamente com teor de umidade médio de 16% b.u.. O milho foi limpo em máquina de limpeza, utilizando a peneira de 3 mm, sendo imediatamente colocado em silo metálico provido de sistema de aeração com fundo em chapa totalmente perfurada, permanecendo sob aeração com ar ambiente durante o período diurno até a obtenção do teor de umidade próximo a 12% b.u., quando foi transferido para o silo experimental. O milho não foi tratado com produto químico para o controle de pragas.

### **3.7. Análises Qualitativas do Milho**

#### *3.7.1. Análises Fisiológicas do Milho*

Foram retiradas, aleatoriamente, amostras simples do produto durante o enchimento do silo, com objetivo de qualificar o milho antes do início do experimento, formando uma amostra composta de cerca de 25 kg. Esta amostra foi dividida subsequentemente, com o uso de um divisor "Boerner", em amostras de trabalho, para verificar o grau de infestação, o teor de umidade, o teor de impurezas e a percentagem de germinação.

A percentagem de infestação foi determinada com quatro repetições, colocando-se 50 grãos inteiros em água durante 24 h, após o qual foram retirados e abertos, com auxílio de um estilete, no sentido do maior comprimento. O grão foi considerado infestado quando se verificava a incidência de alguma fase de inseto.

O teor de umidade foi determinado com três repetições, utilizando-se o método oficial de estufa, conforme a atual portaria de classificação de milho definida pelo Ministério da Agricultura.

A percentagem de impurezas foi determinada com três repetições na máquina de limpeza de amostra de grãos de laboratório, utilizando-se uma peneira de malha 4x12 mm. O valor do teor de impurezas foi calculado pela relação entre a massa das impurezas que passaram pela peneira e a massa inicial da amostra.

Com relação à percentagem de germinação, foi utilizado o teste-padrão de germinação de sementes em rolo de papel (BRASIL, 1992). A contagem foi feita aos quatro (determinação do índice de vigor) e sete dias depois de colocadas as amostras no germinador.

### *3.7.2. Análises Fisioquímicas do Milho*

Objetivando verificar possíveis alterações nas características qualitativas do milho após o tratamento experimental, foram determinados o Índice de Absorção de Água (IAA); o Poder de Inchamento (PI), nas temperaturas de 50°C e de ebulição da água; o Índice de Solubilização (IS), nas temperaturas ambiente, de 50°C e de ebulição da água; e os Índices Característicos do Amilograma (temperatura inicial de pasta (°C), viscosidade máxima (UA), temperatura de viscosidade máxima (°C), viscosidade mínima (UA) e viscosidade final (UA)). Para todas essas análises qualitativas, duas amostras de aproximadamente 5,0 kg foram utilizadas: uma denominada amostra sem tratamento, obtida durante a amostragem inicial, mantida em vidro nas condições psicrométricas de laboratório e analisada no final do período experimental; e outra denominada amostra com tratamento, retirada do silo ao final do experimento. Após a homogeneização das amostras e a retirada de impurezas, cerca de 500 g de cada amostra do milho foram moídos até se tornarem fubá, condição necessária para a realização das análises.

As análises fisioquímicas das amostras de fubá do milho foram realizadas no Laboratório de Amido do Departamento de Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal de Viçosa, e os procedimentos adotados para determinações dos parâmetros foram os descritos por PEREIRA (1996). Os Índices Característicos do Amilograma foram determinados utilizando o viscoamilógrafo Brabender-Duisburg.

### **3.8. Amostragem Testemunha do Milho**

Após a transferência do milho do silo metálico para o silo experimental, o produto foi deixado em repouso durante 10 dias, objetivando alcançar a normalidade de distribuição dos insetos na massa de grãos. Após este período, o produto foi amostrado em quatro pontos, utilizando-se os adaptadores de PVC anteriormente descritos. Um amostrador manual, de comprimento igual a 1.700 mm e diâmetro de 50 mm, com 10 septos distintos e capacidade unitária de aproximadamente 50 g de milho, foi utilizado para a amostragem. O objetivo principal desta amostragem foi de retirar amostras testemunhas antes do início do funcionamento do equipamento, visando determinar o nível de infestação inicial do produto.

A amostra retirada em cada amostragem foi dividida em duas subamostras, sendo cada uma composta por cinco septos. Cada subamostra representava a metade do amostrador, ou seja, uma subamostra era composta pelos cinco primeiros septos da extremidade do amostrador e a outra, pelos últimos cinco septos. Estas subamostras representavam, respectivamente, a amostragem do produto na região central do silo e a amostragem do produto na região próxima à parede deste (borda do silo).

De cada subamostra, que pesava em média 250 g, foram retiradas duas amostras de aproximadamente 30 g, para determinação do teor de umidade pelo método oficial de estufa. O restante da subamostra foi colocado em vidro transparente de tampa perfurada e protegido com tela de organza, o que possibilitava a troca gasosa entre o interior do vidro e o ar ambiente, porém não permitia a fuga de insetos. Esses vidros, no total de oito, devidamente identificados, foram colocados em câmara climática, do tipo B.O.D., com temperatura interna igual a 27°C, permanecendo nessa condição durante 36 dias, garantindo o ciclo completo de vida do inseto. Após este período, foi realizada a contagem total de insetos adultos (vivos e mortos) de cada vidro. As amostras, excluídas dos insetos, retornavam à câmara climática para nova contagem após cinco dias, repetindo o procedimento em intervalos regulares de cinco dias, até completar 30 dias, tempo suficiente para que os ovos, as larvas e as pupas tivessem tempo para atingir a forma adulta. Para auxiliar a retirada dos insetos da amostra de grãos, utilizou-se o “Funil de Belese”.

### **3.9. Período Experimental**

Após a transferência do milho para o silo experimental e a realização da amostragem testemunha, iniciou-se o período experimental, no qual o produto permaneceu durante dois meses no interior do silo sob efeito da atmosfera gerada pelo protótipo.

#### *3.9.1. Amostragem Experimental do Milho*

No decorrer do período experimental, amostragens para determinação do teor de umidade e para acompanhamento do nível de infestação foram realizadas em intervalos regulares de 15 dias. Os procedimentos para com estas amostragens e as suas análises foram feitos semelhantemente aos realizados quando da amostragem testemunha.

#### *3.9.2. Funcionamento do Protótipo*

O protótipo foi acionado em intervalos regulares de sete dias, durante o período experimental, com objetivo de repor as concentrações dos gases aos níveis produzidos por este. Por conseguinte, oito injeções de gases no interior do silo foram realizadas durante os dois meses experimentais.

Durante o funcionamento do protótipo foram coletadas amostras dos gases no duto de saída, em intervalos regulares de 10 min. Na coleta das amostras de gases utilizou-se um succionador de ar acoplado por uma mangueira de látex a uma câmara de ar ("pêra"). Antes da coleta, era feita a purga do amostrador, ou seja, todo o ar estranho contido no amostrador era expelido pelos gases objetos de análise no momento da amostragem. Para leitura da concentração dos gases dióxido de carbono e oxigênio, foi utilizado nas cinco primeiras injeções de gases um analisador eletrônico de gás (marca MOCON, modelo 650), com precisão de 0,1% para o dióxido de carbono e de 0,01% para o oxigênio. Posteriormente, nas três últimas injeções de gases no interior do silo, utilizou-se o Aparelho Analisador de Orsat, com precisão de 0,2% para o CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>. O analisador de gases Orsat utilizado no experimento é mostrado na Figura 11.



Figura 11. Aparelho analisador de gases Orsat, utilizado no experimento.

As temperaturas, no protótipo e no interior do silo, foram monitoradas durante o seu funcionamento em intervalos regulares de 2 min em um medidor de temperatura (DATA LOGGER FLUKE), o qual transmitia as informações via ondas de rádio até um computador, que as registrava.

As temperaturas e as concentrações de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ , obtidas de diferentes pontos do interior do silo, bem como a temperatura do ar ambiente, foram monitoradas diariamente durante os dois meses, nos seguintes horários e períodos semanais do experimento: às 18 h, na 1<sup>a</sup>, 2<sup>a</sup>, 4<sup>a</sup> e 5<sup>a</sup> semanas; às 12 h, na 3<sup>a</sup> semana; e às 8 h, na 6<sup>a</sup>, 7<sup>a</sup> e 8<sup>a</sup> semanas.

Além desses parâmetros de avaliação, durante o funcionamento do protótipo foi medida a massa de carvão vegetal consumida, utilizando uma balança eletrônica com precisão de 1 g.

## 4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. Testes Preliminares

Testes preliminares foram realizados com o objetivo de verificar a operacionalidade do equipamento e a funcionalidade de seus componentes na geração de uma mistura de gases que deveriam apresentar, ao saírem do protótipo Gerador de CO<sub>2</sub>, características como alta concentração de dióxido de carbono, baixas concentrações de oxigênio e monóxido de carbono, bem como temperatura e umidade relativa desejáveis ao armazenamento do produto. Os testes preliminares foram realizados considerando dois procedimentos: operando o sistema com recirculação dos gases e sem recirculação destes.

#### 4.1.1. Testes com a Fornalha Original

As concentrações de CO<sub>2</sub> e de O<sub>2</sub> produzidas pela fornalha original, durante os testes preliminares, são mostradas na Figura 12, operando o sistema com recirculação dos gases, e na Figura 13, operando o sistema sem recirculação.

Comparando os dois procedimentos operacionais, observa-se que, no sistema com recirculação dos gases, a fonte de O<sub>2</sub> é o ar contido no silo e há decréscimo na sua concentração ao longo do tempo (Figura 12), devido à queima na fornalha, enquanto no sistema sem recirculação a fonte de O<sub>2</sub> é o ar atmosférico, onde é constante a sua concentração, resultando na produção uniforme de CO<sub>2</sub> (Figura 13). As concentrações médias produzidas de CO<sub>2</sub> foram de 3,0 e 3,8%, respectivamente para o sistema operando

com recirculação e sem recirculação dos gases. Dessa forma, a fornalha original mostrou-se ineficiente em gerar alta concentração de  $\text{CO}_2$  e baixa concentração de  $\text{O}_2$ , independentemente do procedimento operacional utilizado. O principal motivo pelo qual o objetivo não foi alcançado, quando da utilização da fornalha original, foi que o volume de  $\text{O}_2$ , ao atravessar o interior da câmara de combustão, não permanecia em contato, na sua totalidade, com o carvão vegetal incandescente presente na grelha.

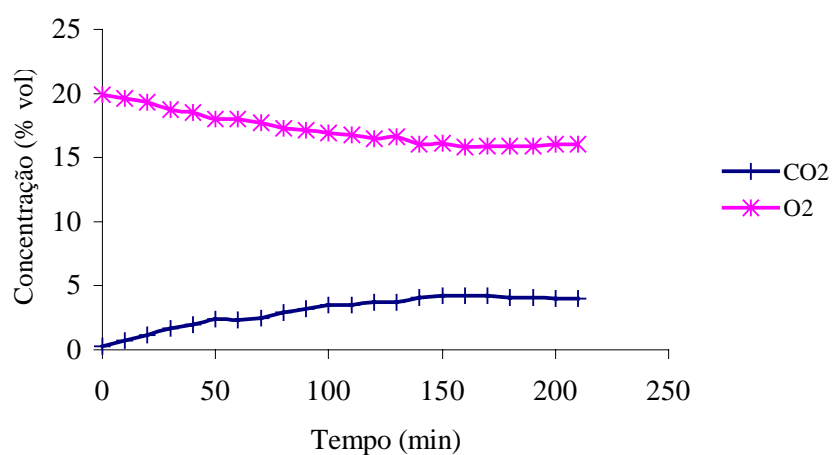


Figura 12- Concentrações de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ , utilizando a fornalha original e operando o sistema com recirculação dos gases.

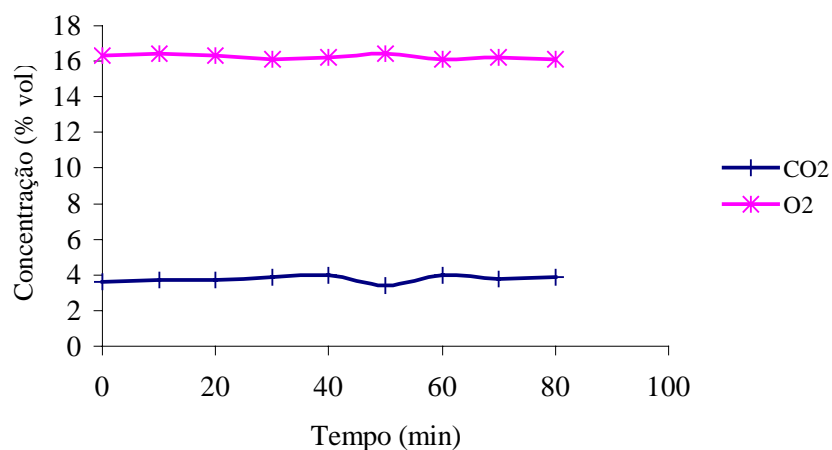


Figura 13- Concentrações de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ , utilizando a fornalha original e operando o sistema sem recirculação.

As concentrações de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  produzidas pela fornalha original, com a presença do canalizador de gases, são mostradas na Figura 14, operando o sistema com recirculação dos gases, e na Figura 15, operando o sistema sem recirculação.

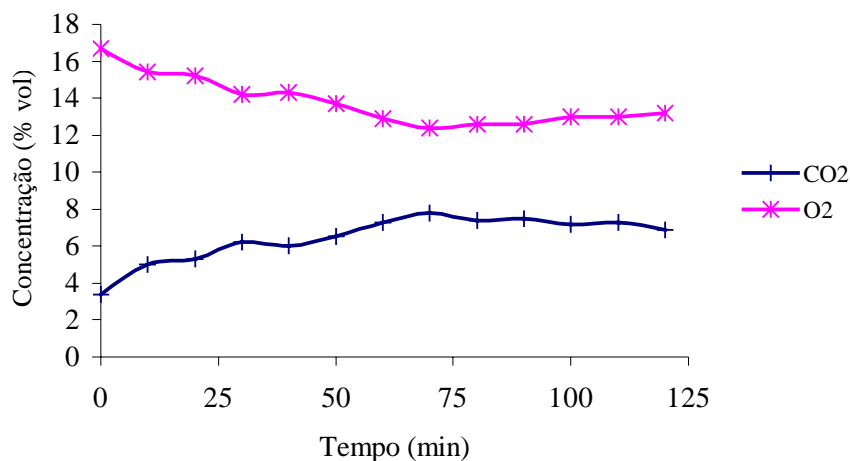


Figura 14- Concentrações de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ , utilizando a fornalha original com o canalizador de gases e operando o sistema com recirculação de gases.

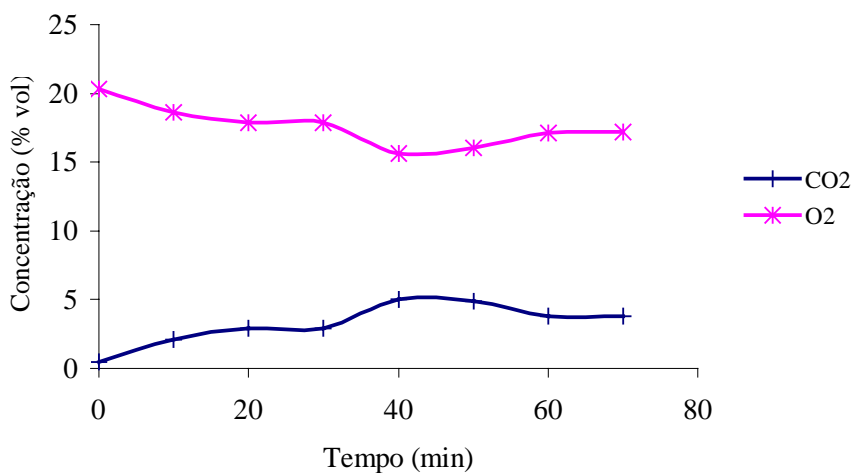


Figura 15- Concentrações de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$ , utilizando a fornalha original com o canalizador de gases e operando o sistema sem recirculação dos gases.

Analisando as Figuras 14 e 15, verifica-se que a operação do sistema com recirculação dos gases produziu concentrações superiores de  $\text{CO}_2$  (concentração média igual a 6,4%), comparativamente ao sistema sem recirculação (concentração média igual a 3,2%), apesar dos comportamentos semelhantes de produção de  $\text{CO}_2$  e decréscimo da

concentração de  $O_2$  em ambos os sistemas. Comparativamente à fornalha original, nota-se que a produção de  $CO_2$  aumentou com a presença do canalizador somente quando o sistema foi operado com recirculação dos gases, possivelmente devido ao acúmulo do gás no silo, aumentando a sua concentração ao longo do período de tempo de funcionamento do protótipo.

A produção de  $CO_2$  e o consumo de  $O_2$  utilizando a fornalha original, mesmo com o canalizador de gases, ficaram aquém do necessário e desejado para a utilização do protótipo no controle de pragas de grãos armazenados. Assim, optou-se por construir nova fornalha, cujas principais características são maior volume da célula de combustão e a obrigatoriedade de os gases provenientes do silo ou do ar atmosférico atravessarem integralmente a grelha.

#### *4.1.2. Testes com a Fornalha*

As concentrações de  $CO_2$  e  $O_2$  produzidas pela nova fornalha são mostradas na Figura 16, operando o sistema com recirculação dos gases, e na Figura 17, operando o sistema sem recirculação dos gases.

As concentrações de  $CO_2$ , produzidas pela fornalha, foram praticamente constantes durante o período de tempo de funcionamento do protótipo, independentemente do procedimento operacional adotado (Figuras 16 e 17). As concentrações médias produzidas de  $CO_2$  foram de 13,1 e 13,8%, respectivamente para o sistema operando com recirculação e sem recirculação dos gases. Explica-se esse resultado pela obrigatoriedade de os gases provenientes do silo (sistema operado com recirculação dos gases) ou do ar atmosférico (sistema operado sem a recirculação dos gases) atravessarem a câmara de combustão, permanecendo por maior período de tempo em contato com o carvão vegetal. Assim, pode-se concluir que, em relação à produção de  $CO_2$ , a nova fornalha apresentou comportamento semelhante quando operada com ou sem recirculação dos gases, com produção média geral de 13,5% de  $CO_2$ .

Com relação ao consumo de  $O_2$ , observa-se nas Figuras 16 e 17 que o comportamento das concentrações diferiu entre os procedimentos operacionais adotados. O comportamento do consumo de  $O_2$ , quando o sistema foi operado com recirculação dos gases (Figura 16), foi constante a partir da metade do tempo de duração do teste preliminar,

enquanto o consumo de  $O_2$ , quando o sistema foi operado sem recirculação dos gases (Figura 17), foi praticamente total até que a massa de carvão vegetal fosse em sua maior parte consumida pelo processo de combustão. A partir desse momento, houve aumento constante da concentração de  $O_2$  na composição dos gases produzidos pelo protótipo. O comportamento diferenciado no consumo de  $O_2$  é explicado pela fonte mantenedora do gás, que no caso da recirculação dos gases foi o silo, com suprimento esgotável de  $O_2$ , ao passo que sem recirculação dos gases foi o ar atmosférico, com fornecimento inesgotável de  $O_2$ .

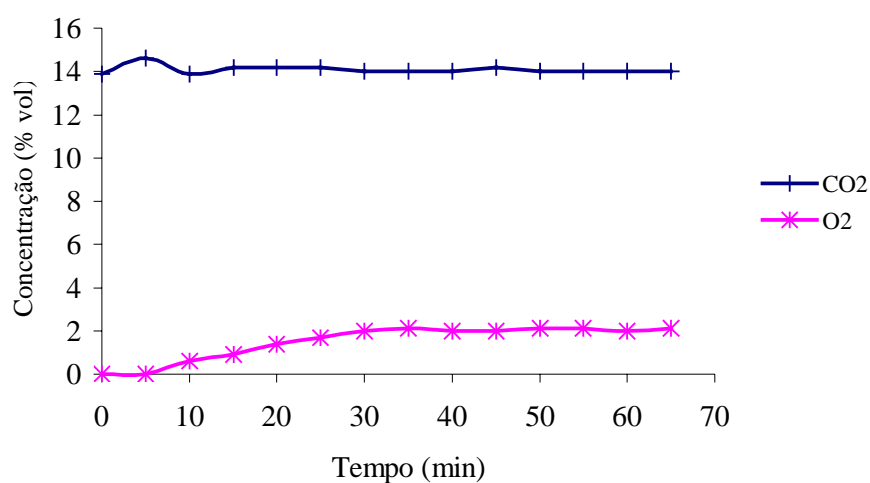


Figura 16- Concentrações de  $CO_2$  e  $O_2$ , utilizando a nova fornalha e operando o sistema com a recirculação dos gases.

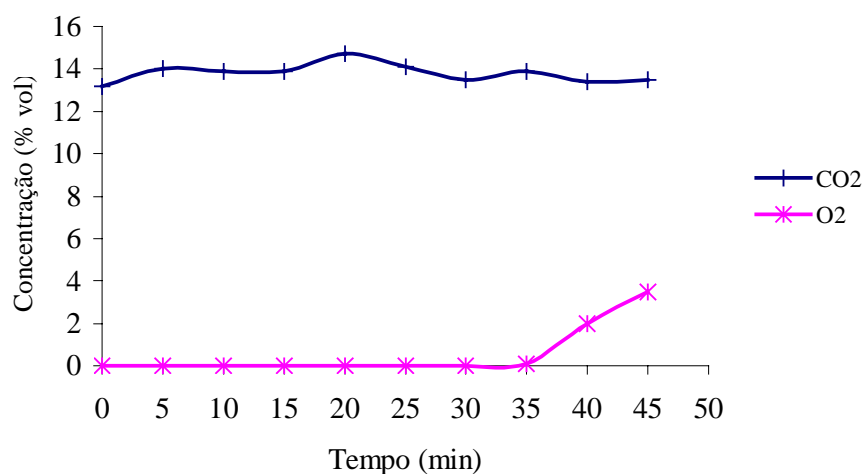


Figura 17- Concentrações de  $CO_2$  e  $O_2$ , utilizando a nova fornalha e operando o sistema sem recirculação dos gases.

Comparativamente à fornalha original, a nova fornalha foi superior na produção de  $\text{CO}_2$  e no consumo de  $\text{O}_2$ , independentemente do procedimento operacional utilizado. Portanto, a nova fornalha foi considerada satisfatória para o prosseguimento do experimento utilizando o equipamento Gerador de  $\text{CO}_2$  no controle de pragas que infestam os grãos agrícolas armazenados.

#### 4.1.3. Vedação do Silo

Alguns testes preliminares foram realizados para o monitoramento das concentrações do dióxido de carbono e do oxigênio no interior do silo experimental vazio, com o objetivo de verificar sua hermeticidade. A Figura 18 mostra as concentrações de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  no centro do silo vazio, nas alturas de 400, 1.200, 2.000 e 2.800 mm em relação ao fundo do silo, medidas nos intervalos de 0, 24 e 48 h após o funcionamento do protótipo.

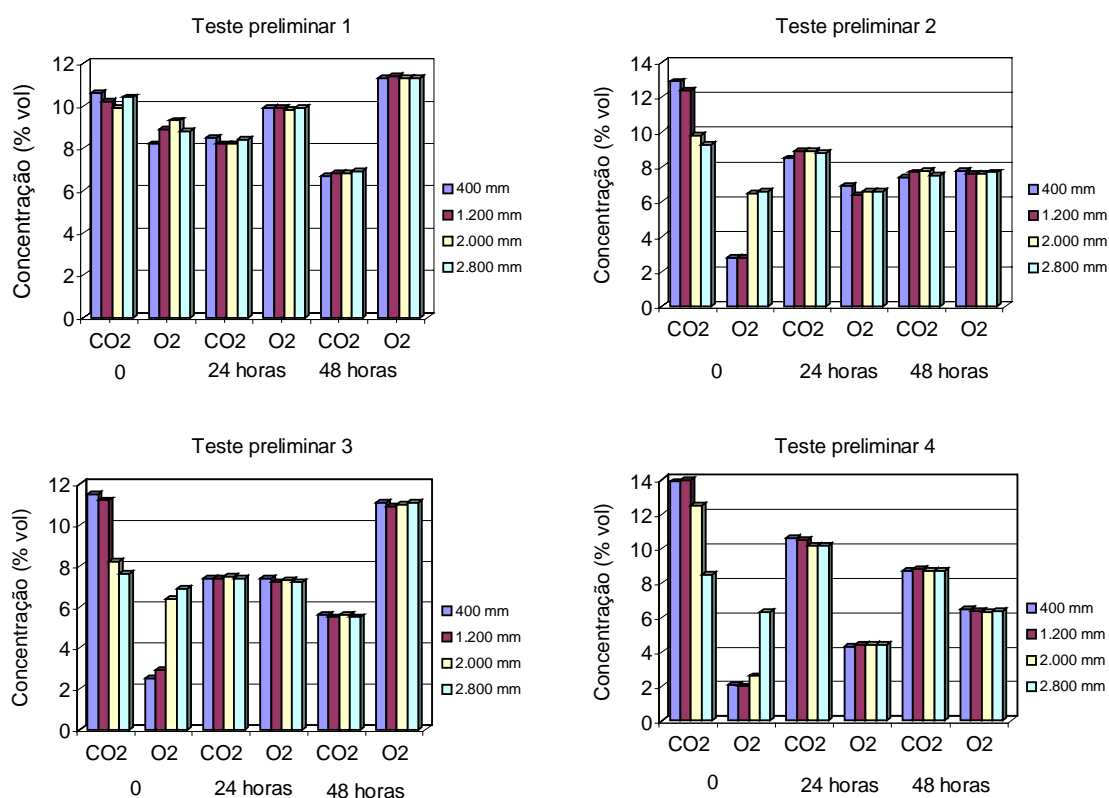


Figura 18- Concentrações de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  no interior do silo experimental vazio, em função do tempo.

De acordo com os gráficos da Figura 18, observa-se diferença nos valores de concentração de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  entre os níveis de alturas no interior do silo imediatamente após o funcionamento do protótipo. Há tendência de maiores concentrações de  $\text{CO}_2$  nas camadas inferiores, explicada pelo fato de a molécula deste ser mais pesada do que a do  $\text{O}_2$ . Após o período inicial de 24 h, há ocorrência de distribuição dos gases no interior do silo, com uniformidade de concentração de cada gás nos diferentes níveis de alturas. Observa-se ainda que, decorridas as 48 h iniciais, ocorreu perda de  $\text{CO}_2$  para o meio externo e aumento da concentração de  $\text{O}_2$  no interior do silo. Conclui-se que, apesar das medidas iniciais realizadas com o objetivo de vedar o silo, trocas gasosas entre o interior do silo e o meio ambiente aconteceram no decorrer do experimento. Portanto, houve necessidade de acionar o equipamento Gerador de  $\text{CO}_2$  em intervalos predeterminados de tempo, visando recompor os níveis de  $\text{CO}_2$  produzidos pelo protótipo.

A Figura 19 mostra as variações das concentrações médias de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  durante os testes preliminares de verificação de hermeticidade do silo experimental.

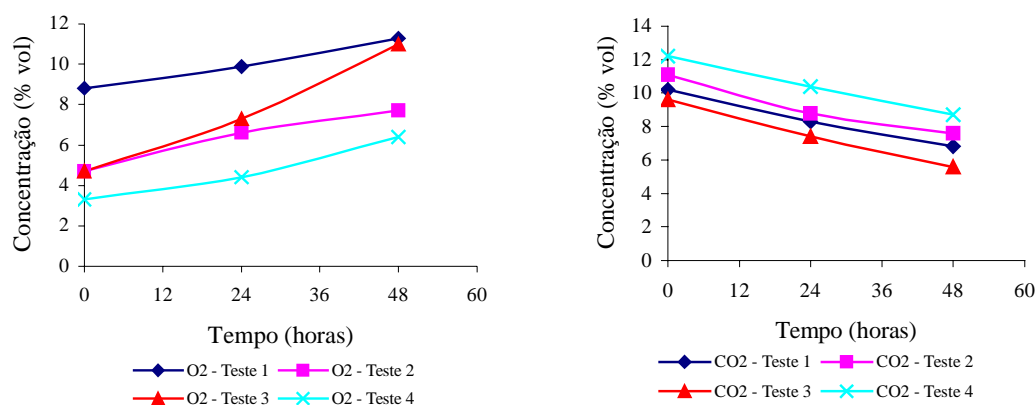


Figura 19 - Concentrações médias de  $\text{O}_2$  e  $\text{CO}_2$  no interior do silo experimental vazio.

A perda do  $\text{CO}_2$  do interior do silo experimental vazio para o meio externo apresentou tendência linear em função do tempo, similarmente ao que aconteceu com a entrada do  $\text{O}_2$  para o interior do silo, fato esse explicado pelo equilíbrio das pressões parciais dos gases nos dois meios.

## 4.2. Período Experimental

Após os testes preliminares, foram colocadas no silo experimental aproximadamente 27 t de milho não-tratado com produto químico, o qual permaneceu durante dois meses sob efeito da atmosfera gerada pelo protótipo. Durante esse período, foram realizadas oito operações de injeção de gases no interior do silo, utilizando o equipamento Gerador de CO<sub>2</sub>. Os dados referentes às temperaturas e as concentrações de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> no equipamento Gerador de CO<sub>2</sub> e no interior do silo durante o decorrer do experimento são apresentados no Apêndice A.

### 4.2.1. Vazão dos Gases no Protótipo

A Figura 20 apresenta as vazões médias dos gases produzidos pelo protótipo e injetados no interior do silo durante o período experimental. Observa-se que, nas cinco primeiras injeções de gases no silo, as vazões médias foram sensivelmente reduzidas a cada injeção, devido ao acúmulo de cinzas e partículas de carvão vegetal no interior dos dutos de cobre do radiador, que obstruíam a passagem dos gases. Após a quinta operação de injeção de gases no silo, os dutos de cobre através dos quais os gases atravessavam o radiador foram desobstruídos, e, a fim de evitar o acúmulo de novas partículas de carvão vegetal nos dutos de cobre, foi acrescentado ao sistema um filtro de telas metálicas imediatamente após a fornalha. Com o filtro, as vazões médias aumentaram no interior dos componentes do protótipo, por causa da desobstrução dos dutos de cobre do radiador.

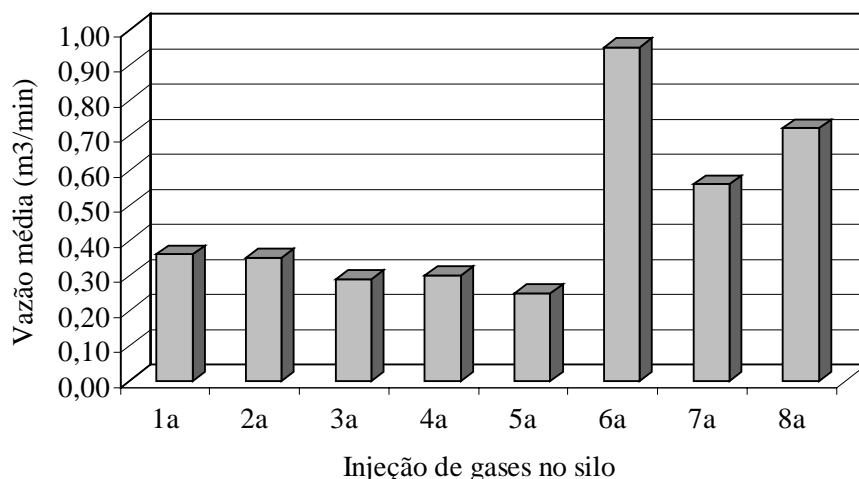


Figura 20- Vazões médias dos gases produzidos pelo protótipo e injetados no silo durante suas operações de funcionamento.

Os volumes de gases injetados no interior do silo durante as operações de funcionamento do protótipo são mostrados na Figura 21.

Considerando a porosidade da massa de milho igual a 43% e a massa específica do produto igual a  $737 \text{ kg.m}^{-3}$  (BROOKER et al., 1974), bem como a massa de milho armazenada (cerca de 27 t) e o volume do silo experimental ( $45 \text{ m}^3$ ), o volume de ar no interior do silo era de aproximadamente  $24 \text{ m}^3$ . Analisando a Figura 21, observa-se que, com exceção da terceira operação de injeção de gases, em todos os outros, os volumes de gases injetados no interior do silo foram superiores ao volume mínimo necessário ( $24 \text{ m}^3$ ) para a completa troca dos gases contidos no silo pelos gases produzidos no protótipo. Os volumes de gases excedentes injetados no silo foram eliminados através do registro contido na parede deste, que permanecia aberto quando do funcionamento do protótipo.

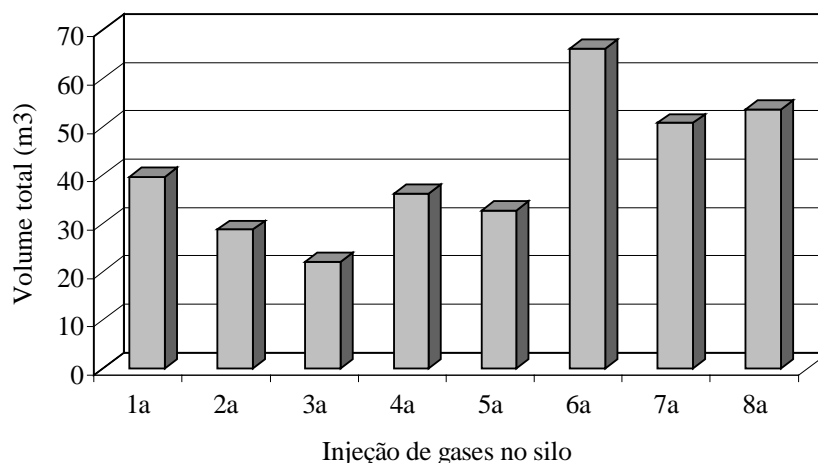


Figura 21 - Volumes de gases produzidos pelo protótipo e injetados no silo durante suas operações de funcionamento.

#### 4.2.2. Produção de $\text{CO}_2$ e $\text{O}_2$ no Protótipo

As concentrações médias dos gases  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{CO}$  estimado, produzidas pelo protótipo durante o seu funcionamento e injetadas no interior do silo, são mostradas na Figura 22.

De acordo com a Figura 22, a concentração média máxima de  $\text{CO}_2$  obtida durante o decorrer do experimento foi de aproximadamente 14,8%, alcançada na primeira injeção de gases no silo, quando esta foi realizada com recirculação dos gases no sistema. A recirculação dos gases no sistema foi possível apenas na primeira operação de injeção, pois no interior do silo havia alta concentração de  $\text{O}_2$ , o que possibilitou sua utilização na queima do carvão vegetal, na câmara de combustão da fornalha.

A segunda operação de injeção de gases foi inicialmente realizada com recirculação, porém não se obteve resultado satisfatório na produção de  $\text{CO}_2$ , pois o interior do silo apresentava-se com baixa concentração de  $\text{O}_2$ , não sendo suficiente para a manutenção da temperatura mínima necessária à combustão completa do carvão vegetal ( $340^\circ\text{C}$ , de acordo com ANDRADE et al., 1984). Como consequência, a produção de  $\text{CO}_2$  pela fornalha diminuía rapidamente, conforme mostra a Figura 23. Dessa forma, a partir da metade da segunda operação de injeção de gases, optou-se por utilizar o sistema de funcionamento do equipamento sem recirculação, ou seja, o  $\text{O}_2$  utilizado para a queima do carvão vegetal na câmara de combustão era proveniente do ar atmosférico. Assim, foram possíveis a manutenção do processo de queima do carvão vegetal e a produção do  $\text{CO}_2$  em níveis satisfatórios e estáveis.

Portanto, recomenda-se, quando da utilização do equipamento Gerador de  $\text{CO}_2$  no controle de pragas de grãos armazenados, que a sua primeira operação seja realizada com recirculação dos gases e que, a partir da segunda operação, o sistema funcione utilizando o ar atmosférico como fonte de oxigênio para queimar o combustível.

Ainda de acordo com a Figura 22, a produção média de  $\text{CO}_2$  e a produção estimada de  $\text{CO}$  na fornalha do protótipo foram de aproximadamente 13,4 e 5,1%, respectivamente. A eficiência de conversão do oxigênio em dióxido de carbono foi de aproximadamente 63,6%, ou seja, a fornalha utilizada no protótipo para queimar o carvão vegetal e gerar o  $\text{CO}_2$  converteu 63,6% do  $\text{O}_2$ , presente no ar atmosférico (21% em volume) e que atravessou a câmara de combustão, em  $\text{CO}_2$ .

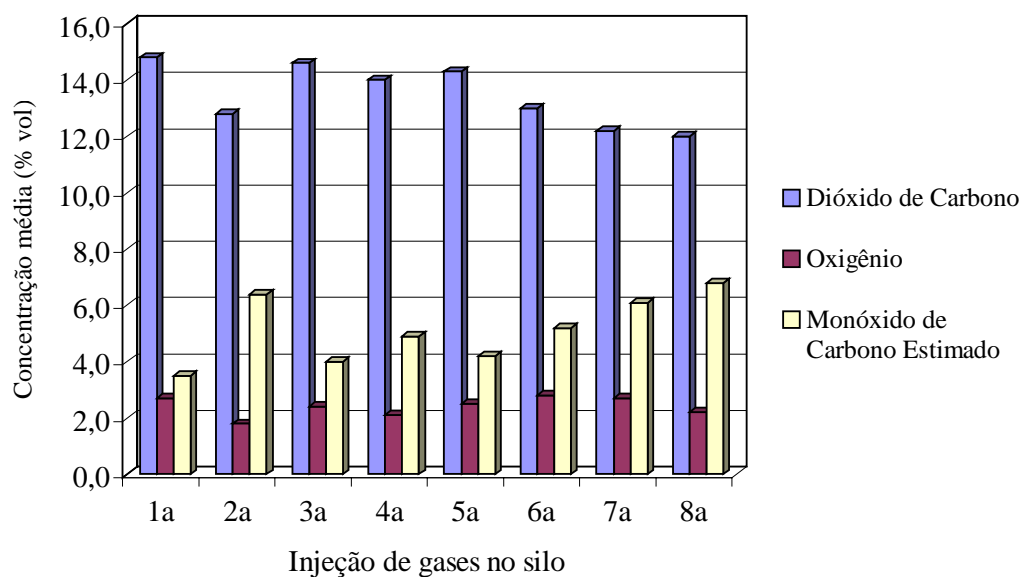


Figura 22 - Concentrações médias de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> produzidas pelo protótipo e injetadas no silo durante suas operações de funcionamento.

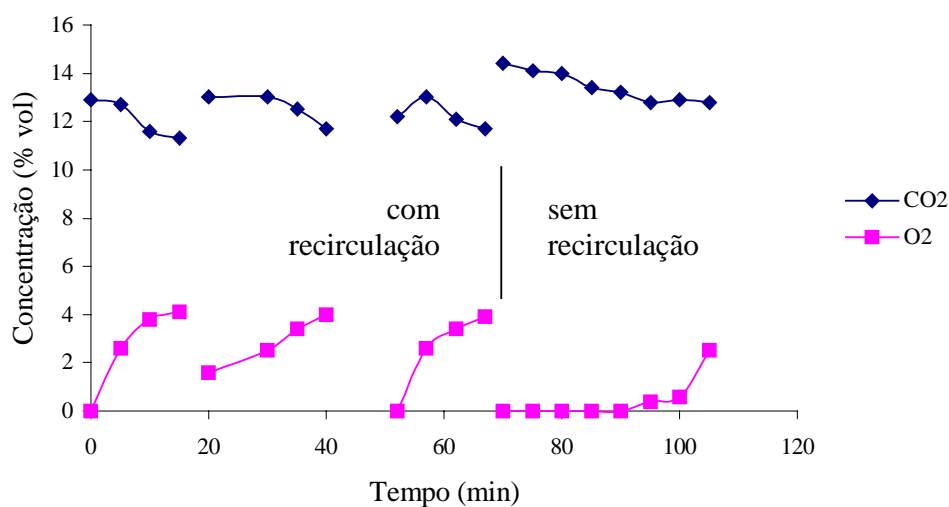


Figura 23 - Concentrações de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> produzidas pelo protótipo durante a segunda operação de injeção de gases no silo.

A concentração média de CO<sub>2</sub> produzida pelo protótipo ficou aquém da mínima necessária, cerca de 60%, para o controle total das pragas que infestam os grãos armazenados (SEMPLE et al., 1992). No entanto, os níveis de concentrações de CO<sub>2</sub>

obtidos no período experimental, utilizando o equipamento Gerador de CO<sub>2</sub>, têm efeitos positivos indiretos no controle dos insetos, como aumentar em até 300% a respiração do inseto e reduzir a concentração de fosfina quando esta é utilizada em combinação com o CO<sub>2</sub> (MUELLER, 1994), assim como causar a abertura dos espiráculos dos insetos, podendo levar à perda de água, dessecação e morte (CHOI et al., 1997).

Com relação a concentração de O<sub>2</sub> injetada no interior do silo, o máximo valor da concentração média foi de aproximadamente 2,8%, e o mínimo, igual a 1,8% (Figura 22). Da concentração volumétrica total de oxigênio utilizada para a queima do carvão vegetal, em média, aproximadamente 63,6% foram convertidos em dióxido de carbono, cerca de 11,4% não reagiram durante o processo de queima do carvão vegetal na câmara de combustão e o restante (cerca de 25%) provavelmente foi transformado em monóxido de carbono, resultado da queima incompleta do combustível. O monóxido de carbono, presente na composição dos gases produzidos pelo protótipo e injetados no interior do silo, não foi monitorado devido à indisponibilidade de equipamento apropriado.

Com relação ao monóxido de carbono, futuros trabalhos de pesquisa devem ser realizados para verificar os possíveis efeitos do gás no controle de pragas de grãos armazenados e nas qualidades biológicas, fisiológicas e químicas do produto armazenado.

#### *4.2.3. Temperatura e Umidade Relativa dos Gases no Protótipo*

A Figura 24 apresenta as temperaturas médias dos gases provenientes da fornalha, antes e após atravessarem o trocador de calor, e a temperatura do ar ambiente durante as operações de funcionamento do protótipo.

Em todas as operações de funcionamento do equipamento Gerador de CO<sub>2</sub>, os gases com alta temperatura provenientes da fornalha, ao saírem do trocador de calor, apresentaram temperaturas próximas à do ar ambiente, independentemente da temperatura inicial destes gases, como pode ser observado na Figura 24. Os maiores valores médios de temperatura dos gases, observados nas três últimas injeções, foram resultado da ampliação dos componentes do sistema, com o acréscimo de um filtro de telas metálicas, o que proporcionou aumento na vazão dos gases no protótipo e conseqüentemente melhorou a taxa de queima do carvão vegetal na câmara de combustão. Além disso, este filtro reteve cinzas e partículas do carvão vegetal que anteriormente obstruíam a passagem dos gases

através dos componentes do protótipo e a entrada de ar atmosférico no interior da câmara de combustão. Como resultado, as temperaturas médias referentes às cinco primeiras injeções de gases no silo foram mais baixas. Pode-se concluir que o trocador de calor utilizado no protótipo, composto pelo radiador e ventilador axial, foi eficiente, diminuindo a temperatura dos gases provenientes da fornalha para valores próximos aos da temperatura do ar ambiente, de forma que estes pudessem ser injetados no interior do silo em condições favoráveis à conservação do produto armazenado.

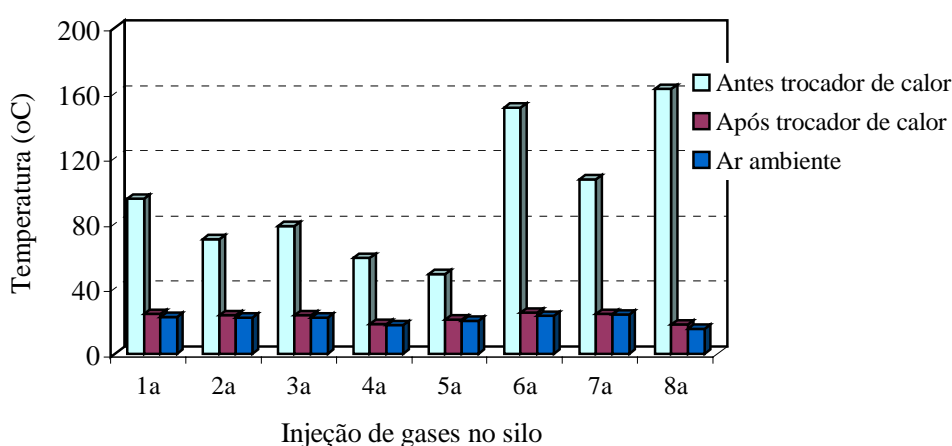


Figura 24 - Temperaturas médias do ar ambiente e dos gases antes e após atravessarem o trocador de calor.

A Figura 25 mostra as temperaturas médias dos gases antes e após atravessarem o componente condensador do protótipo. Este componente ficava localizado imediatamente após o trocador de calor. Verifica-se que as temperaturas médias dos gases, após passarem pelo condensador, atingiram valores inferiores ao da temperatura média do ar ambiente durante a operação de funcionamento do protótipo. Este comportamento se deve à troca de calor proporcionada pelo gradiente de temperatura que existiu entre os gases provenientes do trocador de calor, com temperatura próxima à do ar ambiente, e o fluido refrigerante (álcool).

A Figura 26 apresenta as temperaturas médias do álcool no início e no final das operações de funcionamento do protótipo. O objetivo de reduzir a temperatura inicial do fluido refrigerante para valores próximo de 5°C negativos não foi alcançado. Além de

falhas elétricas, que retardaram o “timer” de acionamento do sistema de refrigeração, outros problemas técnicos, como a realização do experimento em hora não-programada, devido principalmente às intempéries, contribuíram para que tal objetivo não fosse alcançado.

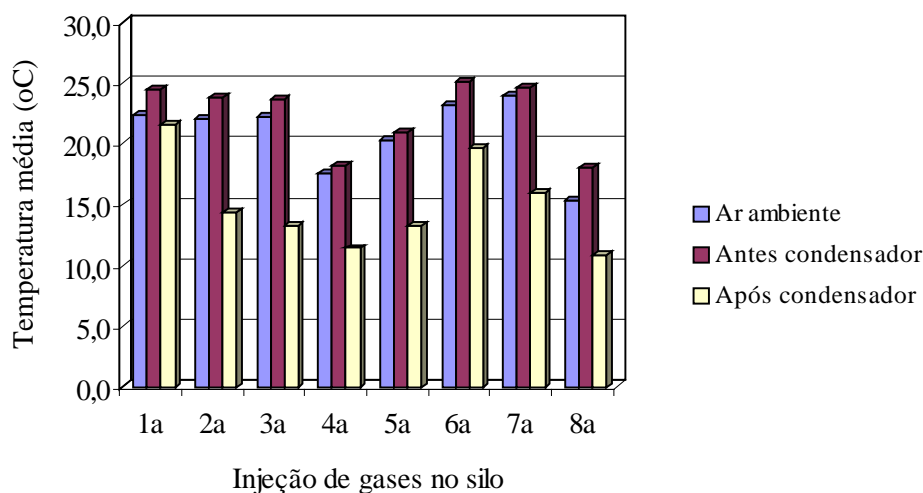


Figura 25 - Temperaturas médias do ar ambiente e dos gases antes e após atravessarem o condensador.

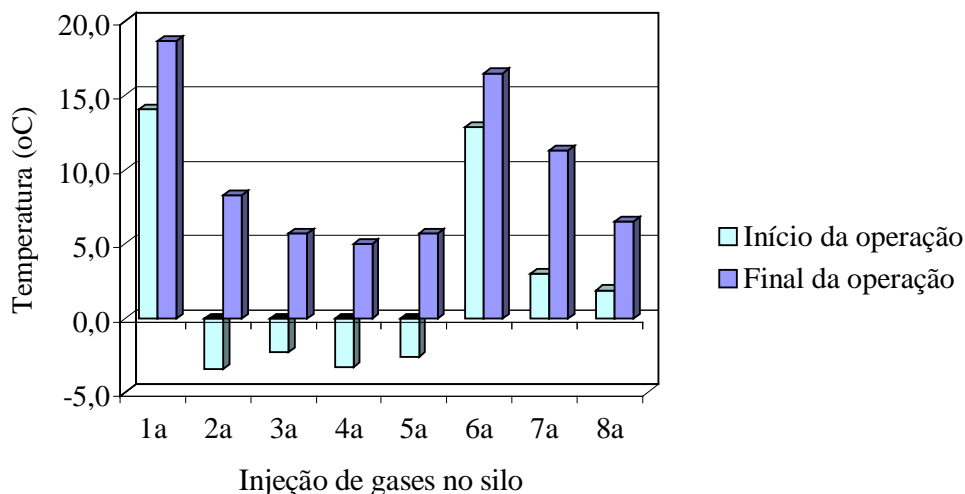


Figura 26 - Temperaturas médias do álcool no início e no final das operações de funcionamento do protótipo.

Comparando as Figuras 25 e 26, observa-se que a temperatura média dos gases ao saírem do sistema de refrigeração está diretamente relacionada com a temperatura inicial

do álcool, ou seja, quanto mais baixa a temperatura inicial do álcool, mais baixa será a temperatura média dos gases ao saírem do sistema de refrigeração. Na primeira e na sexta injeção de gases no silo, verifica-se, pela Figura 26, que as temperaturas iniciais do álcool apresentavam altos valores, o que resultou, de acordo com a Figura 25, em temperaturas médias mais altas dos gases ao saírem do sistema de refrigeração.

A diminuição da temperatura dos gases para valores inferiores ao da temperatura do ponto de orvalho ocasionou condensação parcial de vapor d'água no interior do condensador, resultando na redução da umidade relativa média destes, como pode ser observado na Figura 27. A condensação do vapor d'água foi verificada pela variação visual do nível de água no reservatório, cuja finalidade era recolher e armazenar a água proveniente do condensador. Além disso, verifica-se na Figura 27 que as médias das umidades relativas dos gases, ao entrarem no condensador, apresentaram valores acima de 90%, com exceção da sexta operação de injeção, que apresentou valor médio próximo a 82%. Ao saírem do sistema, apresentaram valores médios inferiores a 80%, com exceção das três últimas injeções de gases, que apresentaram valores superiores a 80%.

O aumento da umidade relativa dos gases ao saírem do condensador, nas três últimas operações de funcionamento do protótipo, pode ser creditado principalmente à maior vazão dos gases obtidos com o acréscimo do filtro de tela metálica, que proporcionou maior velocidade dos gases no interior do sistema e, conseqüentemente, menor tempo de contato entre os gases e a superfície refrigerada do condensador. Dessa forma, conclui-se

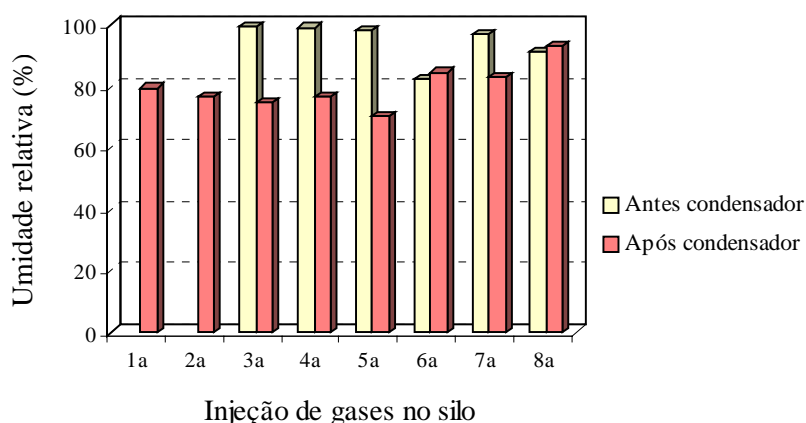


Figura 27 - Umidade relativa média dos gases antes e após atravessarem o condensador.

que o sistema de refrigeração foi eficiente em diminuir a temperatura dos gases provenientes do trocador de calor, porém, em relação à diminuição da umidade relativa, ele se mostrou eficiente somente para vazões dos gases inferiores a  $0,4 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ . Nas duas primeiras operações de injeção de gases, o sensor que media a temperatura de bulbo molhado dos gases, localizado antes do sistema de refrigeração, apresentou problemas técnicos de monitoramento, que foram corrigidos a partir da terceira operação de funcionamento do protótipo.

#### 4.2.4. Consumo de Carvão Vegetal

A Figura 28 mostra o consumo horário de carvão vegetal queimado na câmara de combustão da fornalha do protótipo. Verifica-se que o consumo de carvão vegetal nas cinco primeiras operações de injeção de gases foi aproximadamente constante, com consumo médio de  $2,3 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ . Nas três últimas operações, o consumo médio de carvão vegetal duplicou ( $4,6 \text{ kg} \cdot \text{h}^{-1}$ ), pelo fato de as vazões dos gases no equipamento terem aumentado. Os consumos específicos médios semanais de carvão vegetal, em relação ao volume de milho no interior do silo ( $36,6 \text{ m}^3$ ), foram de  $63 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$  e  $126 \text{ g} \cdot \text{h}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$  de milho, respectivamente para as cinco primeiras e as três últimas operações de injeção de gases no silo. Esses consumos específicos, que podem ser considerados baixos, indicam a viabilidade econômica de utilização do equipamento Gerador de  $\text{CO}_2$ , visto que o carvão vegetal é encontrado comercialmente com facilidade, a preço relativamente baixo.

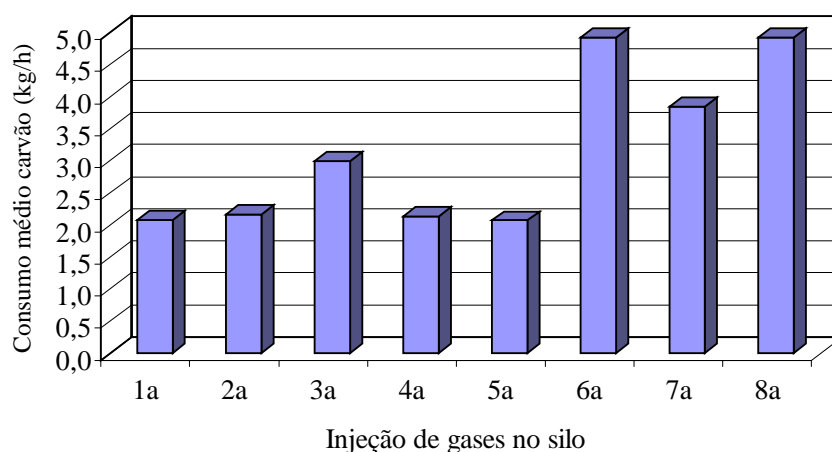


Figura 28 - Consumo médio de carvão vegetal durante as operações de funcionamento do protótipo.

O Quadro 1 apresenta o resultado das análises imediata e física do carvão vegetal utilizado no experimento. De acordo com CETEC (1988), o teor médio de carbono fixo no carvão vegetal é de aproximadamente 74,5%.

Quadro 1 - Resultado das análises imediata e física do carvão vegetal utilizado no experimento

Teor de umidade	9,9 (% b.s.)
Densidade aparente	350 (kg.m <sup>-3</sup> )
Poder calorífico inferior	32.390 (kJ.kg <sup>-1</sup> )
Materiais voláteis	13,1 (%)
Cinzas	1,16 (%)
Teor de carbono fixo	85,7 (%)

O carvão vegetal utilizado no experimento apresentou como característica principal o alto teor de carbono fixo, que, no processo de combustão na fornalha, liberou maior quantidade de calor. Entretanto, os componentes do equipamento, responsáveis pelo arrefecimento, foram eficientes em diminuir a temperatura dos gases provenientes da combustão para níveis próximos aos do ar ambiente.

#### 4.2.5. Tempo de Operação do Protótipo

O tempo necessário para injetar os gases no interior do silo e o tempo total de funcionamento do protótipo, considerando o tempo de injeção e de reabastecimento da fornalha, são apresentados na Figura 29. Na primeira e terceira operações de funcionamento, os tempos de injeção dos gases e totais de funcionamento do protótipo foram equivalentes. No decorrer desses testes, não houve reabastecimento de carvão vegetal na câmara de combustão da fornalha, pelo fato de a produção de CO<sub>2</sub>, no decorrer das operações de injeção, permanecer aproximadamente constante e, relativamente, com alta concentração, obtendo-se no final as mais elevadas médias de produção do gás, como verificado na Figura 22. Ainda analisando a Figura 29, observa-se que, em média, as três últimas operações tiveram um tempo de funcionamento relativamente mais curto, porém com alto consumo de carvão (Figura 28), consequência do aumento das vazões dos gases no interior do equipamento Gerador de CO<sub>2</sub> (Figura 20).

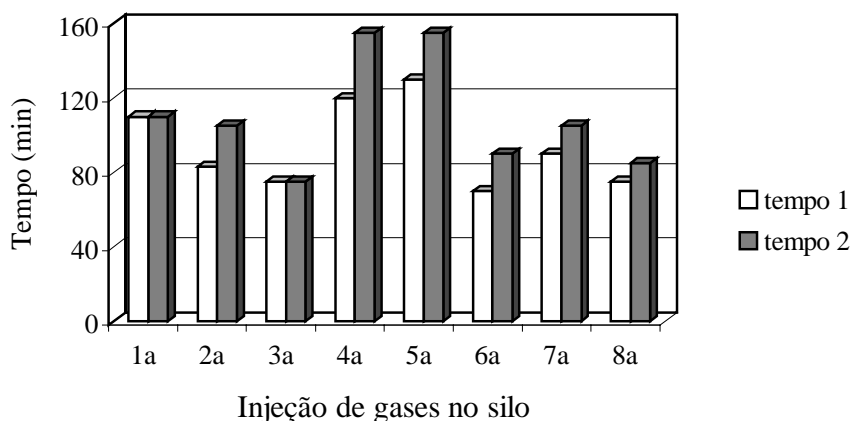


Figura 29 - Tempo necessário para injetar os gases no silo (tempo 1) e tempo total de operação do protótipo (tempo 2).

#### 4.2.6. Concentrações de $CO_2$ e $O_2$ no Silo

As concentrações médias de dióxido de carbono e oxigênio no interior do silo, antes e após a primeira operação de injeção de gases, são mostradas na Figura 30. Nota-se que a concentração média de  $CO_2$  aumentou e a concentração média de  $O_2$  diminuiu imediatamente após a injeção de gases pelo protótipo, conforme o objetivo do experimento. O decréscimo da concentração de  $O_2$  (aproximadamente 82% do  $O_2$  foi utilizado no processo de combustão) foi superior ao aumento da concentração de  $CO_2$  (aproximadamente 77% do  $O_2$  foi transformado em  $CO_2$ ), ou seja, cerca de 23% do  $O_2$  consumido na combustão do carvão vegetal foi transformado, em maior parte, em  $CO$ .

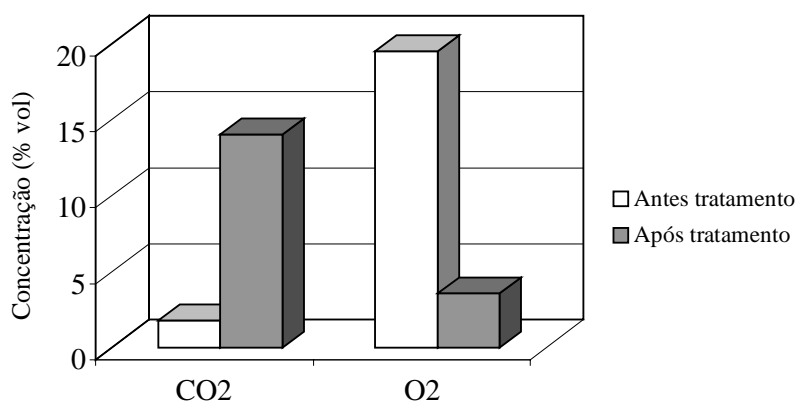


Figura 30 – Concentrações média de  $CO_2$  e  $O_2$  antes e após a primeira operação de injeção dos gases no interior do silo.

A Figura 31 apresenta as variações das concentrações médias diárias de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  no interior do silo durante o período de realização do experimento. Observam-se picos regulares nas concentrações de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  produzidas pelo equipamento Gerador de  $\text{CO}_2$ , que foi utilizado em intervalos regulares de sete dias, durante oito semanas, com a finalidade de aumentar e diminuir, respectivamente, as concentrações internas de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  no interior do silo. Verifica-se que as concentrações médias diárias de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  apresentaram comportamento similar ao longo do período de experimento, ou seja, a concentração média diária de  $\text{CO}_2$  diminuiu diariamente, enquanto a concentração média diária de  $\text{O}_2$  aumentou, até o sétimo dia após cada operação do protótipo.

A operação de funcionamento do protótipo tinha ainda como objetivo a reposição no interior do silo das concentrações médias de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  por ele produzidas. Este objetivo foi alcançado, pois a cada operação do protótipo verifica-se aumento na concentração interna de  $\text{CO}_2$  e diminuição da concentração de  $\text{O}_2$ , nas oito operações de injeção de gases.

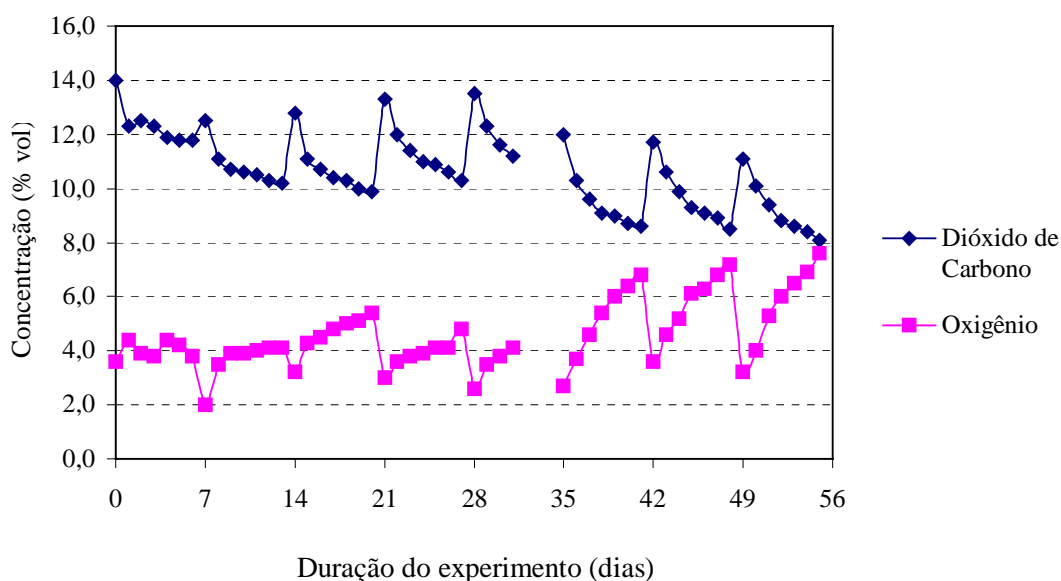


Figura 32 - Comportamento diário das concentrações médias de dióxido de carbono e oxigênio no interior do silo durante o período experimental.

As concentrações internas de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> foram alteradas principalmente devido às trocas gasosas existentes entre o ar intergranular e o ar ambiente, através da parede do silo. Nas primeiras 24 h após cada operação de injeção da mistura gasosa, a concentração média de CO<sub>2</sub> decresceu e a de O<sub>2</sub> aumentou em taxas superiores às dos seis dias seguintes. Este intervalo de 24 h parece ser, provavelmente, o tempo necessário para a distribuição natural das concentrações dos gases no interior do silo.

A alteração no comportamento das concentrações dos gases CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> no interior do silo a partir da sexta semana, em relação às semanas anteriores, é explicada pela troca de equipamento de monitoramento dos gases. Por motivo de indisponibilidade, o equipamento eletrônico utilizado nas cinco primeiras semanas, e que apresentava um tempo de resposta de cerca de 10 s, foi trocado por um equipamento do tipo Orsat, com tempo médio de resposta de aproximadamente 6 min. Dessa forma, o monitoramento instantâneo das concentrações de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>, provenientes do equipamento e injetados no silo, ficou comprometido, com prejuízo para a obtenção da maximização do CO<sub>2</sub> e a minimização do O<sub>2</sub> no momento da queima do carvão vegetal na câmara de combustão do protótipo.

A Figura 32 mostra as concentrações médias semanais do CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> no interior do silo, no decorrer do experimento. Durante as cinco primeiras semanas, a concentração média de O<sub>2</sub> foi igual a 4,0%, enquanto a concentração média de CO<sub>2</sub> foi de 11,4%. Nas três últimas semanas, a concentração média de O<sub>2</sub> aumentou para 5,5% e a de CO<sub>2</sub> diminuiu para 9,5%. Esta diminuição da concentração média de CO<sub>2</sub> no último período foi devido principalmente à injeção de maior concentração de O<sub>2</sub> durante a operação do equipamento, considerando que as concentrações estavam sendo monitoradas no Orsat no momento da operação do protótipo.

BAILEY (1965) demonstrou que a concentração de oxigênio precisa ser mantida abaixo de 4,5% (dependendo da temperatura, do teor de umidade, etc.) para produzir uma atmosfera letal ao mais suscetível inseto de grãos armazenados. Portanto, nas cinco primeiras semanas do experimento, a concentração média obtida de oxigênio no interior do silo foi adequada para controlar o *S. zeamais* presente na massa de grãos. Assim, o equipamento Gerador de CO<sub>2</sub> desenvolvido mostrou ser adequado para gerar uma atmosfera desfavorável aos insetos de grãos armazenados. Além disso, as pequenas

alterações nas concentrações de  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  no interior do silo podem ser creditadas às adaptações realizadas neste, visando transformá-lo em semi-hermético.

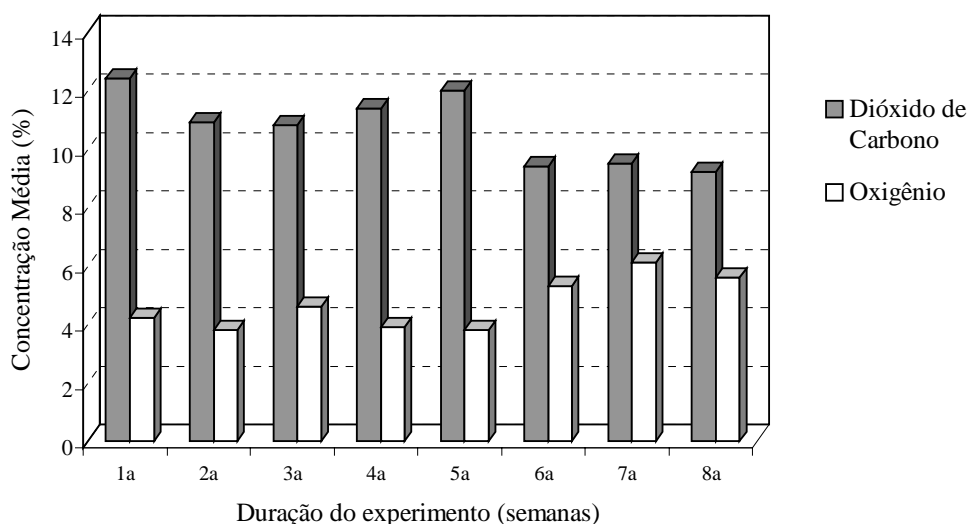


Figura 32 - Concentrações médias semanais de dióxido de carbono e oxigênio no interior do silo durante o período experimental.

As concentrações médias semanais do  $\text{CO}_2$  e  $\text{O}_2$  nos diferentes níveis de altura do silo (400, 1.200, 2.000 e 2.800 mm), medidas na região central do silo e no raio de 1.100 mm, são mostradas, respectivamente, na Figura 33 e na Figura 34. A altura identificada por 2.800 mm correspondia, no interior do silo, ao nível localizado imediatamente acima da massa de grãos.

Analisando a Figura 33-A, observa-se que as concentrações médias do  $\text{CO}_2$  permaneceram praticamente constantes na região central do silo, independentemente do nível de altura, enquanto na região de raio de 1.100 mm (Figura 33-B) as concentrações médias foram ligeiramente superiores no nível inferior do silo, em todas as semanas, com variação máxima de 1,4 ponto percentual ocorrida na sétima semana.

De acordo com os gráficos mostrados na Figura 34, verifica-se a ocorrência de maiores concentrações do  $\text{O}_2$  na região superior do silo, ou seja, no espaço vazio compreendido entre a superfície da massa de grãos e o teto do silo. Na região de raio de

1.100 mm (Figura 34-B), houve tendência de aumento da concentração do  $O_2$  com o aumento no nível de altura do silo.

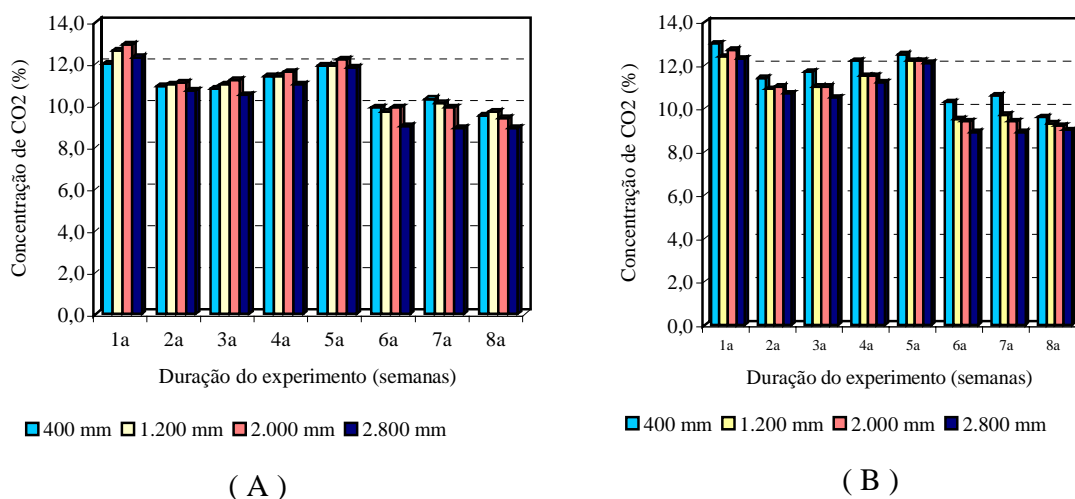


Figura 33 - Concentrações médias semanais do  $CO_2$  nos vários níveis de altura, medidas na região central do silo (A) e na região de raio de 1.100 mm (B).

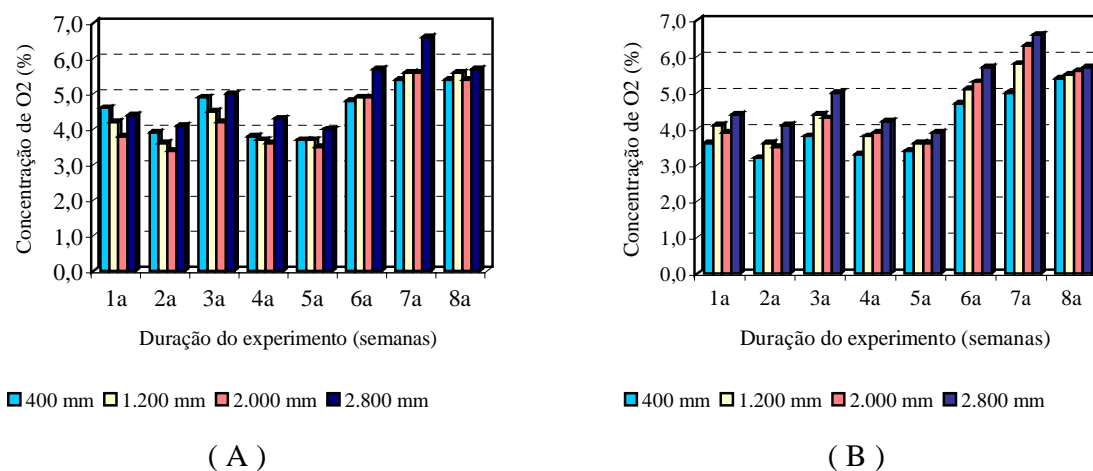


Figura 34 - Concentrações médias semanais do  $O_2$  nos vários níveis de altura, medidas na região central do silo (A) e na região de raio de 1.100 mm (B).

Considerando os resultados apresentados nas Figuras 33 e 34, pode-se concluir que foi pequeno o efeito da gravidade sobre a distribuição dos gases  $CO_2$  e  $O_2$  no interior do silo. Este efeito tem como causa provável o peso molecular das moléculas do  $CO_2$  e  $O_2$ , com a tendência de maior concentração do  $CO_2$  na região inferior e de maior concentração do  $O_2$  na região superior do silo.

As concentrações médias semanais do CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> em função do raio do silo (0, 1.100 e 2.200 mm), medidas nos níveis de altura de 1.200 mm e 2.000 mm, são mostradas, respectivamente, na Figura 35 e na Figura 36.

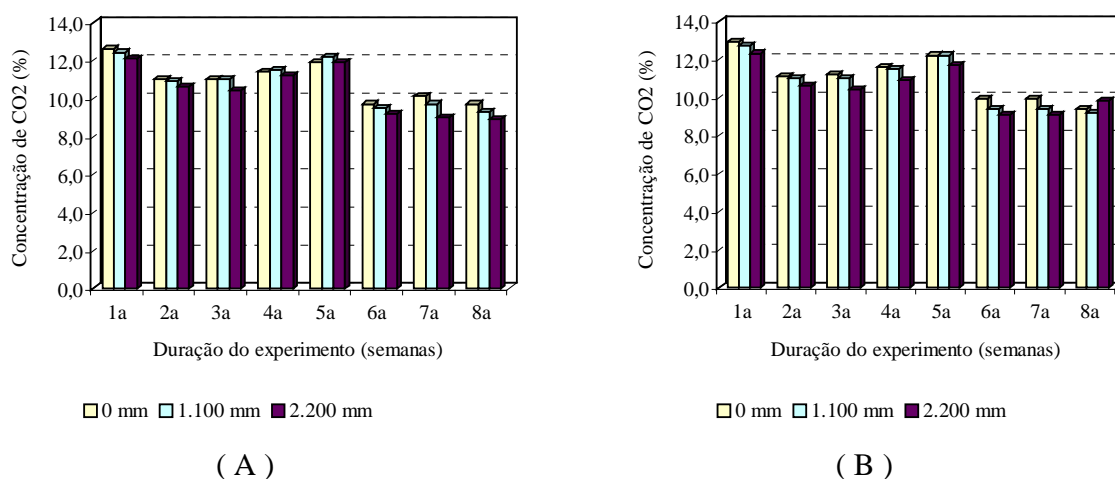


Figura 35 - Concentrações médias semanais do CO<sub>2</sub> em função do raio do silo, medidas nos níveis de altura de 1.200 mm (A) e 2.000 mm (B).

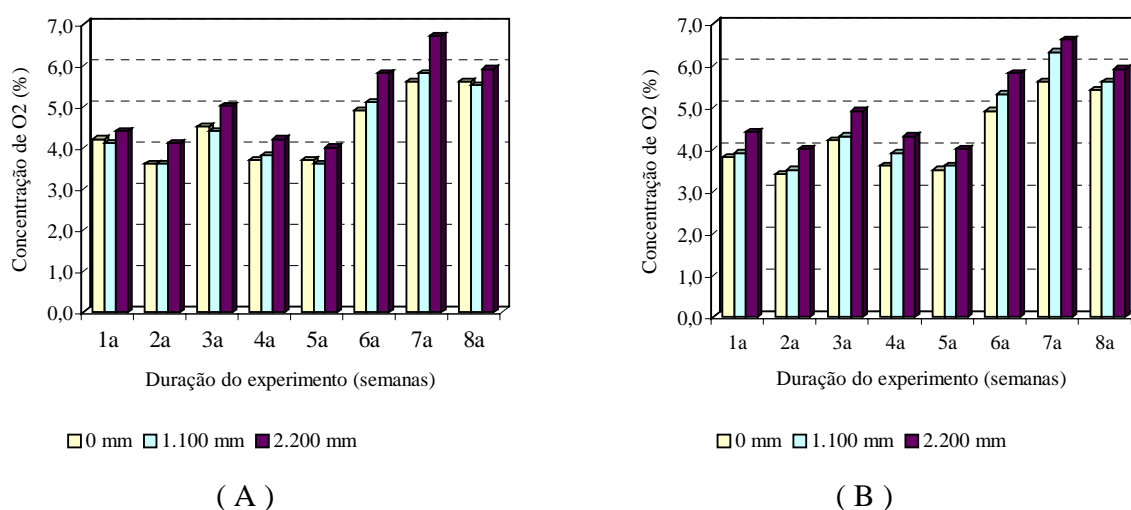


Figura 36 - Concentrações médias semanais do O<sub>2</sub> em função do raio do silo, medidas nos níveis de altura de 1.200 mm (A) e 2.000 mm (B).

De acordo com os resultados apresentados na Figura 35, observa-se em cada semana que as maiores concentrações de CO<sub>2</sub> ocorreram no centro do silo, decrescendo a concentração com o aumento do raio, independentemente do nível de altura do silo (gráficos A e B). No entanto, este pequeno gradiente de CO<sub>2</sub> não tem importância prática,

para as condições estudadas, uma vez que a diferença semanal máxima verificada no decorrer do experimento foi de 1,1 ponto percentual. A Figura 36 mostra a tendência de aumento da concentração de  $O_2$  à medida que aumenta o raio ou aproxima-se da parede do silo. Comparativamente, os resultados mostrados nos gráficos da Figura 36 apresentam comportamento semelhante ao longo do período de experimento.

Ainda de acordo com as Figuras 35 e 36, próximo à parede do silo, construída em ferro-cimento, a concentração de  $CO_2$  é menor devido principalmente à existência de trocas gasosas entre o interior do silo e o meio externo, através da parede de argamassa. Estas trocas gasosas favoreceram o aumento da concentração de  $O_2$  no interior do silo, principalmente na região próxima à parede, em detrimento da concentração de  $CO_2$ . De acordo com os resultados apresentados nas Figuras 33, 34, 35 e 36, pode-se considerar a ocorrência de uma distribuição uniforme do  $CO_2$  e  $O_2$  na atmosfera intergranular do milho armazenado no silo experimental, quando desconsiderado o espaço vazio sob a superfície dos grãos.

#### 4.2.7. Temperaturas no Interior do Silo

A Figura 37 mostra as variações diárias da temperatura ambiente e da temperatura média interna medida imediatamente acima da massa de grãos armazenada.

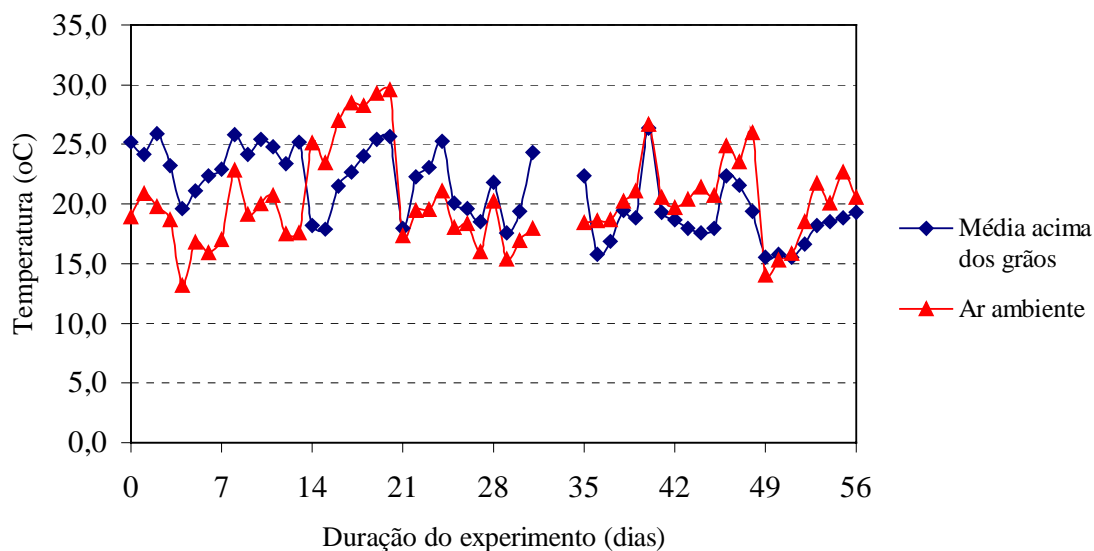


Figura 37 – Variação da temperatura do ar ambiente e dos gases confinados entre a massa de grãos e o teto do silo.

Observa-se na Figura 37 que a temperatura dos gases contidos acima da massa de grãos variou conforme a temperatura externa do ambiente, ou seja, a estrutura do silo em ferro-cimento não isolou termicamente a massa de gases confinados entre a massa de grãos e o teto do silo. Os limites superior e inferior de temperatura dos gases contidos acima da massa de grãos variaram entre 15,5°C e 25,9°C, para os horários monitorados.

A Figura 38 apresenta o comportamento da temperatura da massa de grãos armazenados, em equilíbrio com a massa de ar intergranular, e a temperatura do ambiente externo, em valores médios. Diferentemente da variação da temperatura dos gases contidos acima da massa de grãos, a temperatura do milho armazenado no silo variou entre 22,0 e 24,1°C, não acompanhando as flutuações da temperatura ambiente.

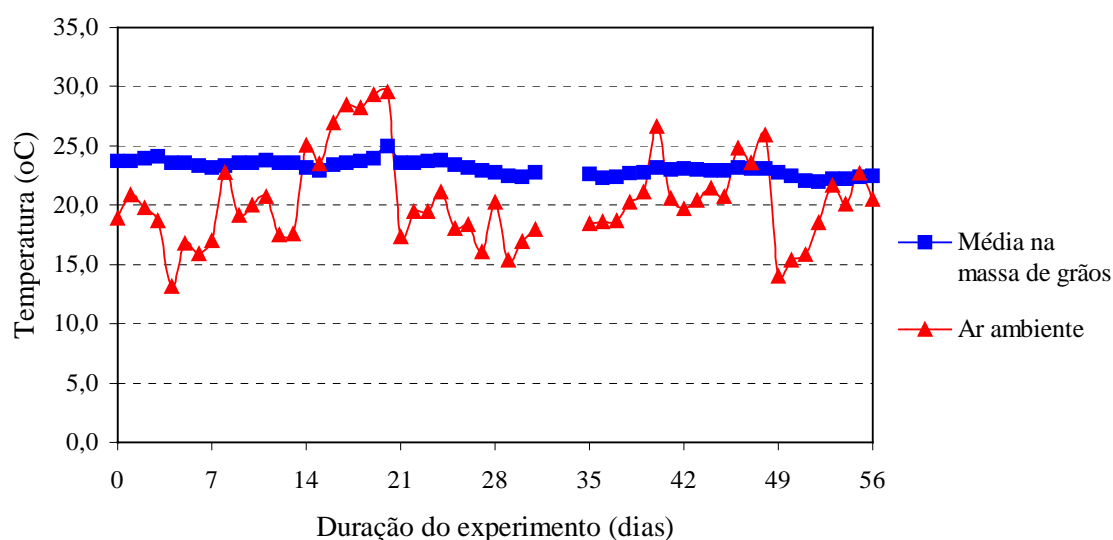


Figura 38 – Variações das temperaturas do ar ambiente e dos gases confinados, entre a massa de grãos e o teto do silo experimental.

Uma consequência provável dessa pequena variação de temperatura na massa de grãos é que não houve efeito de gradientes de temperatura nas concentrações gasosas do ar intergranular, com distribuição praticamente uniforme das concentrações de oxigênio e de dióxido de carbono no interior do silo, conforme observado nas Figuras 33, 34, 35 e 36.

### 4.3. Caracterização do Milho

O milho utilizado no experimento foi armazenado com umidade média igual a 11,8% b.u. e 0,35% de impurezas. Os dados referentes às determinações de umidade do

grão, índice de vigor, percentagem de germinação, grau de infestação e contagem de insetos estão apresentados no Apêndice B.

O inseto identificado no milho utilizado durante o período experimental foi o *S. zeamais*. Para as análises qualitativas do milho e avaliações do possível efeito da atmosfera gerada pelo equipamento Gerador de CO<sub>2</sub> sobre o controle da infestação do *S. zeamais*, três amostragens do produto foram feitas e assim identificadas:

- a) Testemunha: amostra retirada do silo e analisada no início do experimento, sem o efeito da atmosfera gerada pelo protótipo.
- b) Testemunha final: subamostra retirada da amostra inicial e mantida em condições climáticas normais de laboratório e analisada no final do período experimental.
- c) Tratamento final: amostra retirada do silo no final do experimento e que esteve sob efeito da atmosfera gerada pelo equipamento durante o período experimental.

#### 4.3.1. Umidade do Milho

A variação média de umidade do milho armazenado no silo durante o período experimental é mostrada na Figura 39. A umidade média do milho durante os 60 dias de armazenamento e sob efeito da atmosfera gerada pelo protótipo foi igual a 11,8% b.u.. A variação máxima de umidade no período foi de cerca de 1,8 ponto percentual, e todas as amostras retiradas quinzenalmente apresentavam valores médios superiores a 11,5%, com exceção da amostra retirada no trigésimo dia, cujo valor médio foi igual a 10,8%. Essa

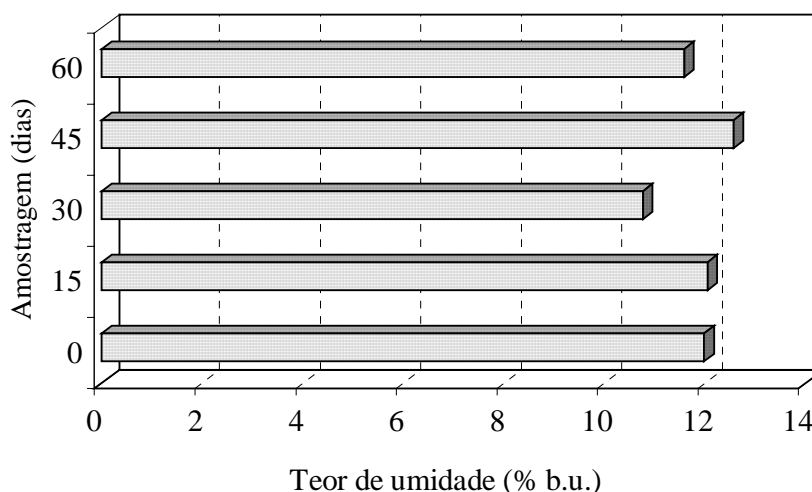


Figura 39 - Variação de umidade do milho no silo durante o período experimental.

secagem do produto pode ter sido causada pelas maiores temperaturas ambientes diárias na quinzena anterior à amostragem, recuperando os níveis de umidade nas semanas seguintes, quando o ar ambiente apresentava-se com temperatura baixa e alta umidade relativa.

#### 4.3.2. Vigor e Germinação do Milho

A Figura 40 mostra os valores médios do índice de vigor e da germinação do milho utilizado no experimento para as amostras testemunha, testemunha final e tratamento final. No Quadro 2 é apresentado o resultado da análise estatística.

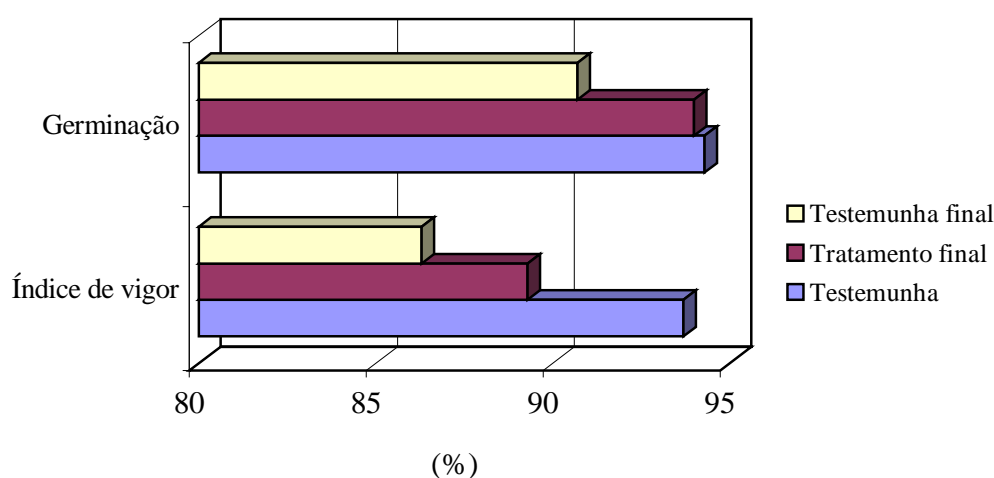


Figura 40 - Percentagens médias do índice de vigor e da germinação do milho.

Quadro 2 - Análise estatística do índice de vigor e da germinação do milho

	<b>Índice de vigor médio (%)</b>	<b>Germinação média (%)</b>
Testemunha	93,7 a	94,3 a
Tratamento final	89,3 a b	94,0 a
Testemunha final	86,3 b	90,7 a

Obs.: as médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

De acordo com a Figura 40 e com o resultado da análise estatística apresentada no Quadro 2, conclui-se que não houve efeito significativo do tratamento a que o produto foi submetido no silo sobre o índice de vigor e a germinação do milho, em relação à

amostra testemunha. Este resultado é semelhante ao encontrado por WHITE e JAYAS (1991), quando verificaram que a percentagem de germinação do trigo não foi afetada pelo  $\text{CO}_2$ , durante o período de 84 dias. Observando os valores de germinação, verifica-se a ocorrência de efeito da alta concentração de  $\text{CO}_2$  e baixa concentração de  $\text{O}_2$  sobre a percentagem de germinação do milho armazenado sob efeito do tratamento, quando comparado com o produto, caso este fosse armazenado sob condições climáticas normais e sem qualquer tratamento. Praticamente não ocorreu diminuição da percentagem de germinação do milho sob tratamento ao longo do período de armazenamento. O efeito pode ter sido provocado pela diminuição da taxa de respiração dos grãos que estavam armazenados em condições atmosféricas adversas.

#### 4.3.3. Testes de Qualidade do Milho

Foram realizados os testes de absorção de água, solubilização e o amilograma do fubá do milho utilizado no experimento, para verificar possíveis alterações na qualidade do produto após o tratamento no silo. A Figura 41 mostra os resultados do poder de inchamento das amostras testemunha final e tratamento final. Observa-se que o poder de inchamento, que caracteriza a capacidade de absorção de água do fubá de milho, praticamente não foi alterado pelo armazenamento sob atmosfera com alta concentração de  $\text{CO}_2$ , quando comparado com o milho mantido em condições de laboratório até o final do experimento. Somente para temperatura de  $100^\circ\text{C}$ , há pequeno acréscimo no valor do poder de inchamento da amostra testemunha, no sentido de melhorar a qualidade do produto final.

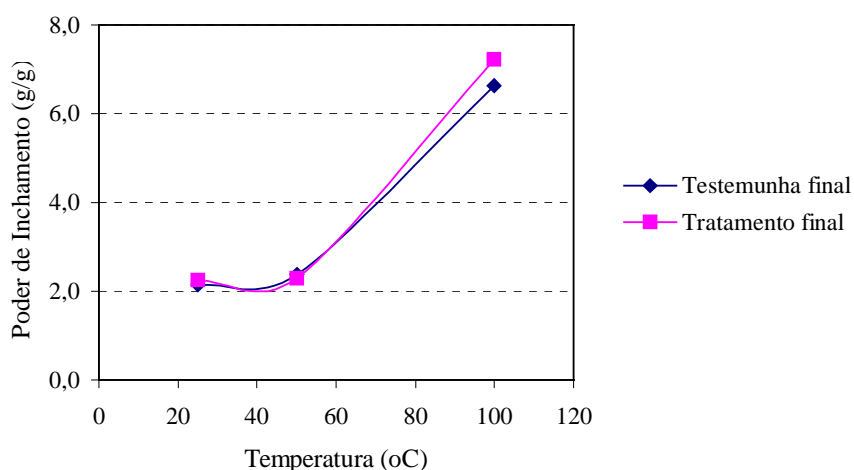


Figura 41 - Poder de inchamento do fubá do milho utilizado no experimento.

Em relação ao índice de solubilização, mostrado na Figura 42, verifica-se que, para as temperaturas inferiores a 60°C, o fubá do milho que estava sob efeito do tratamento não teve a sua capacidade de solubilização em água alterada. Acima deste valor, houve tendência crescente no índice, explicada pela maior liberação de amilose e de sólidos solúveis da estrutura dos grânulos. Em termos de qualidade, pode-se comentar que ocorreu melhora nesta característica do milho sob efeito do tratamento, em relação à amostra testemunha final, embasada na melhor capacidade de absorção de água e de solubilização do fubá de milho, resultando, quando no processamento do produto em alta temperatura, em melhor viscosidade.

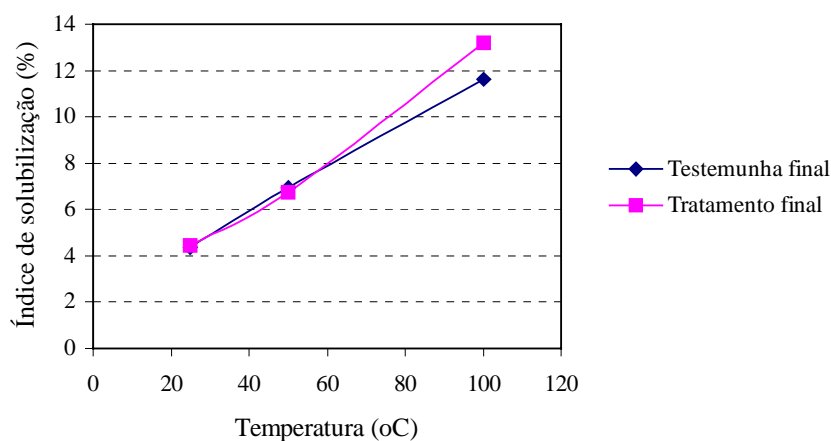


Figura 42 - Índice de solubilização do fubá do milho utilizado no experimento.

O Quadro 3 mostra os índices característicos do amilograma para as amostras de fubá do milho testemunha final e tratamento final. Observa-se que praticamente não ocorreram alterações relevantes nos índices característicos do amilograma que pudessem diferenciar as duas amostras finais do fubá de milho, com exceção da viscosidade máxima da amostra do tratamento final, que apresentou valor superior ao da amostra testemunha final. Esta maior viscosidade pode ser devido às pontes de H<sub>2</sub>, responsáveis pela manutenção da estrutura dos grânulos, que, ao se tornarem mais resistentes sob efeito da atmosfera com alta concentração de CO<sub>2</sub> e baixa concentração de O<sub>2</sub>, permitiram maior absorção de água, resultando em um produto com maior viscosidade, de acordo com EVANGELISTA (1989).

Quadro 3 - Amilograma do fubá de milho na concentração de 17,8% (p/v)

	Testemunha final	Tratamento final
Temperatura inicial de pasta (°C)	85,0	83,5
Viscosidade máxima (UA)	430	480
Temperatura de viscosidade máxima (°C)	88,4*	91,4*
Viscosidade mínima (UA)	370	380
Viscosidade final (UA)	390	380

\* No período de resfriamento.

#### 4.4. Avaliação do Controle de Insetos

##### 4.4.1. Percentagem de Infestação

O Quadro 4 mostra a percentagem média de infestação das amostras testemunha, testemunha final e tratamento final, bem como o resultado da análise estatística.

Quadro 4 - Percentagem média de infestação do milho utilizado no experimento e o resultado da análise estatística

	Grau de infestação médio (%)
Testemunha final	16,5 a
Tratamento final	12,5 a b
Testemunha	10,0 b

Obs.: as médias seguidas de pelo menos uma mesma letra não diferem entre si a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Analisando o Quadro 4, verifica-se que a amostra com tratamento no final do período experimental apresentou menor percentagem média de infestação, quando comparada à amostra sem tratamento. O resultado da análise estatística mostra que não houve efeito significativo do tratamento utilizando o equipamento gerador de CO<sub>2</sub> sobre a percentagem de infestação do milho armazenado no silo experimental, em relação à testemunha. A utilização dos gases gerados pelo protótipo teve efeito de diminuir a proliferação dos insetos no interior do silo, impedindo o seu desenvolvimento normal. O efeito negativo da mistura gasosa, composta de alta concentração de CO<sub>2</sub> e baixa

concentração de O<sub>2</sub>, no desenvolvimento e na proliferação dos insetos que infestam os grãos armazenados foi também comprovado por diversos trabalhos realizados (BAILEY, 1965; LINDGREEN e VINCENT, 1970; CALDERON e NAVARRO, 1979; SEMPLE et al., 1992; MUELLER, 1994), os quais comprovaram a eficácia de diferentes composições de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> no controle de pragas, porém foram realizados em laboratório.

#### 4.4.2. Contagem de Insetos

Amostras de milho foram retiradas nas diferentes posições do silo, em intervalos regulares de 15 dias, e mantidas em câmara do tipo BOD durante 36 dias, quando se realizou a primeira contagem do número de insetos vivos e mortos, e posteriormente, a cada cinco dias, até completar o total de 66 dias na câmara. Após cada contagem do número de insetos presentes nas amostras, estes eram eliminados. O Quadro 5 mostra o número total de insetos encontrados nas amostras ao final dos 36 dias, na câmara BOD.

Quadro 5 - Número total de insetos encontrados nas amostras de milho retiradas quinzenalmente do silo e mantidas por 36 dias na câmara BOD

	Sem tratamento	Com tratamento			
	Inicial	15 dias	30 dias	45 dias	60 dias
<b>Cone - centro</b>	21	16	6	2	6
<b>Cone - borda</b>	18	10	5	9	1
<b>0mm - centro</b>	10	9	6	4	2
<b>0mm - borda</b>	22	7	5	6	4
<b>480mm - centro</b>	20	9	3	2	1
<b>480mm - borda</b>	13	10	5	4	4
<b>960mm - centro</b>	12	9	4	3	1
<b>960mm - borda</b>	16	12	3	9	6

De acordo com os resultados do Quadro 5, as amostras iniciais apresentaram maior número de insetos do que todas as outras, independentemente da posição e do período de amostragem do milho submetido ao tratamento. Observa-se, ainda, redução constante do número total de insetos ao longo do período de experimento, ou seja, maior controle da infestação com o aumento do período de exposição à atmosfera desfavorável. Alguns pesquisadores (CALDERON e NAVARRO, 1979; KRISHAMURTY et al., 1986; CASELLA, 1998; COELHO, 1999) encontraram interações significativas entre o período

de exposição a diferentes concentrações de gases e a eficácia no controle de pragas de grãos armazenados, ou seja, quanto maior o período de exposição, maior eficácia no controle dos insetos. Um dos prováveis motivos para este resultado se deve à redução da postura dos insetos causada pela atmosfera intergranular desfavorável, gerada pelo protótipo. Esta observação é compartilhada por SEMPLE et al. (1992). Estes autores comentaram que a taxa de reprodução dos insetos é bastante reduzida quando estes são expostos em concentrações próximas de 10% de CO<sub>2</sub> no ar. Após 36 dias na câmara, os insetos das amostras iniciais tiveram oportunidade de se desenvolver normalmente, enquanto os demais, que ficaram sob o efeito da atmosfera controlada do silo, diminuíram o ritmo de desenvolvimento ao longo do período de experimento.

O Quadro 6 apresenta o número total de insetos encontrados nas amostras de milho ao final dos 66 dias na câmara do tipo BOD, ou seja, a soma da primeira geração (F1), mostrada no Quadro 5, com a segunda geração (F2) dos insetos.

Quadro 6 - Número total de insetos encontrados nas amostras de milho retiradas quinzenalmente do silo e mantidas por 66 dias na câmara BOD

	Sem tratamento	Com tratamento			
	Inicial	15 dias	30 dias	45 dias	60 dias
<b>Cone - centro</b>	80	23	9	3	13
<b>Cone - borda</b>	59	13	6	9	1
<b>0mm - centro</b>	22	10	6	4	3
<b>0mm - borda</b>	161	8	5	6	7
<b>480mm - centro</b>	26	10	3	2	1
<b>480mm - borda</b>	18	14	5	4	6
<b>960mm - centro</b>	29	11	4	3	1
<b>960mm - borda</b>	42	16	3	9	7

Verifica-se no Quadro 6 que, nas amostras iniciais, ocorreu desenvolvimento normal da geração F2, com acentuada proliferação dos insetos, comparativamente ao número de insetos presentes nas outras amostras. Nas amostras retiradas ao longo do experimento, isto é, sob o efeito da atmosfera intergranular gerada pelo protótipo, houve controle substancial do desenvolvimento dos insetos, estabilizando-se o desenvolvimento após 30 dias de tratamento. Comparando esses resultados com os do Quadro 5, nota-se que, a partir do trigésimo dia sob efeito da atmosfera, possivelmente, a geração F1 teve reduzida a sua postura e, conseqüentemente, o seu desenvolvimento, resultando em um controle de

aproximadamente 91,1% na geração F2 ao final dos 66 dias na câmara. As diferenças entre o número total de insetos ao final dos períodos de 36 dias (geração F1) e de 66 dias (geração F2) na câmara BOD foram de 4, 1 e 14 insetos, respectivamente, para os períodos de amostragem de 30, 45 e 60 dias. A ocorrência de maior quantidade de insetos na geração F2, no período de amostragem de 60 dias, se deve provavelmente ao aumento da concentração de O<sub>2</sub> e à diminuição da concentração de CO<sub>2</sub> no interior do silo experimental a partir do 45<sup>o</sup> dia, conforme mostra a Figura 32.

A Figura 43 apresenta as infestações relativas experimental e estimada do número total de insetos de cada período de amostragem, em relação ao número total de insetos das amostras iniciais, no final de 36 dias na câmara do tipo BOD.

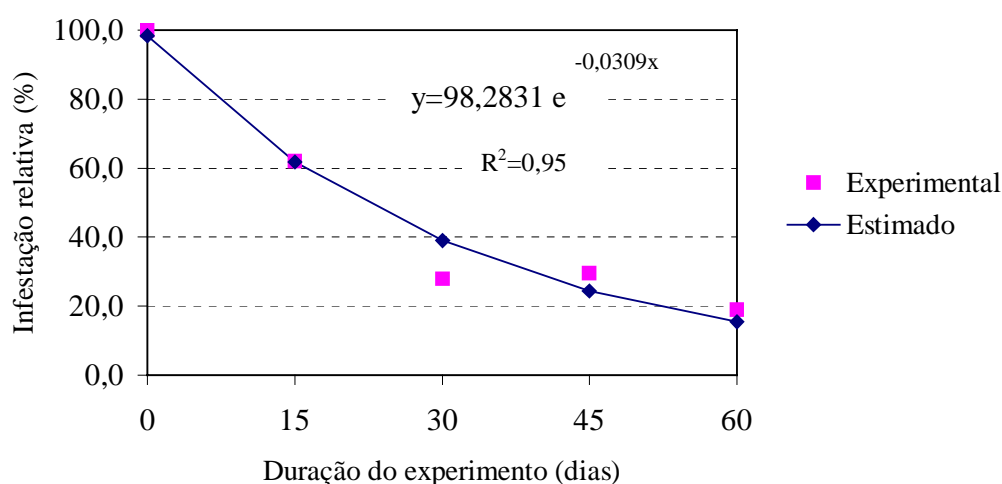


Figura 43 - Infestações relativas experimental e estimada das amostras analisadas ao final de 36 dias na câmara BOD, em função da duração do experimento.

Observa-se que, ao final do período de 60 dias de experimento sob efeito da atmosfera gerada pelo equipamento, a infestação relativa foi de aproximadamente 19% da infestação inicial do produto, ou seja, a infestação foi controlada em cerca de 81% da infestação inicial. Portanto, pode-se concluir que a atmosfera intergranular gerada pelo equipamento Gerador de CO<sub>2</sub> controlou satisfatoriamente a infestação do *S. zeamais* presente no milho armazenado no silo. Os resultados obtidos no controle do inseto ainda demonstram a viabilidade técnica da utilização de equipamentos geradores de CO<sub>2</sub> no controle de pragas de grãos armazenados em silos semi-herméticos.

Com relação à posição espacial preferencial dos insetos no silo, isto é, a sua distribuição na massa de milho, as Figuras 44 e 45 mostram, respectivamente, a ocorrência de insetos por altura de amostragem (cone de descarga, 0, 480 e 960 mm) e por localização em cada nível de altura (centro e borda do silo), considerando o número total de insetos encontrados nas amostras ao final de 36 dias de incubação na câmara BOD. Nota-se que houve maior preferência dos insetos por se desenvolverem no cone de descarga do silo e na borda da massa granular, possivelmente em decorrência da presença dos dutos de aeração no piso de descarga e da dificuldade de vedação eficiente do dispositivo de descarga do produto, bem como pela constante troca gasosa entre as atmosferas interna e externa, através da parede porosa do silo. Essas trocas gasosas favorecem a existência de maior concentração de oxigênio próximo à parede do silo e no cone de descarga do produto.

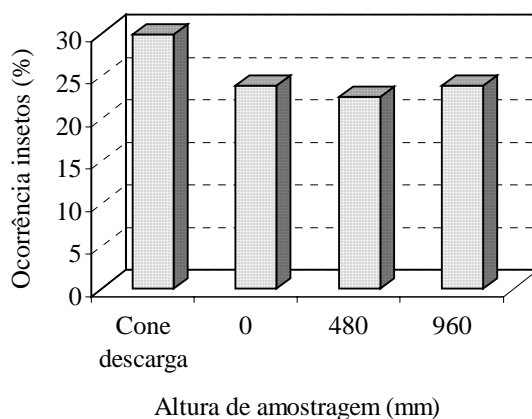


Figura 44 - Distribuição espacial da ocorrência de insetos por altura de amostragem no silo.

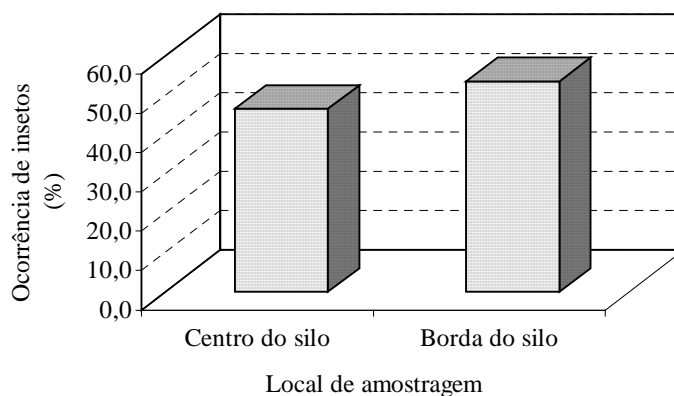


Figura 45 - Distribuição espacial da ocorrência de insetos por local de amostragem no silo.

A Figura 46 mostra a condição final das amostras do milho retiradas do silo na região central do cone de descarga, ao longo do período experimental e que foram mantidas em câmara BOD até o dia 20/01/2001. Do início do experimento, em 08/08/2000, até a dia 20/01/2001, a amostra testemunha e as amostras retiradas com 15, 30, 45 e 60 dias permaneceram, respectivamente, por 166, 151, 138, 123 e 108 dias na câmara BOD à temperatura de 27°C.

Nota-se na Figura 46 que, após 166 dias na câmara BOD, os insetos (*S. zeamais*) presentes na amostra testemunha proliferaram, enquanto, as amostras que permaneceram por algum período no silo sob efeito da atmosfera gerada pelo protótipo se apresentaram praticamente isentas de insetos, comprovando a eficiência do equipamento Gerador de CO<sub>2</sub> no controle da infestação. Apesar de períodos distintos de permanência das amostras na câmara BOD, elas permaneceram tempo suficiente para o desenvolvimento de no mínimo três gerações do inseto sob a condição climática da câmara BOD. O comportamento verificado é similar nas amostras retiradas de outras posições no silo, ou seja, proliferação de insetos nas amostras testemunhas e controle na infestação nas amostras que ficaram sob efeito da atmosfera gerada pelo protótipo.

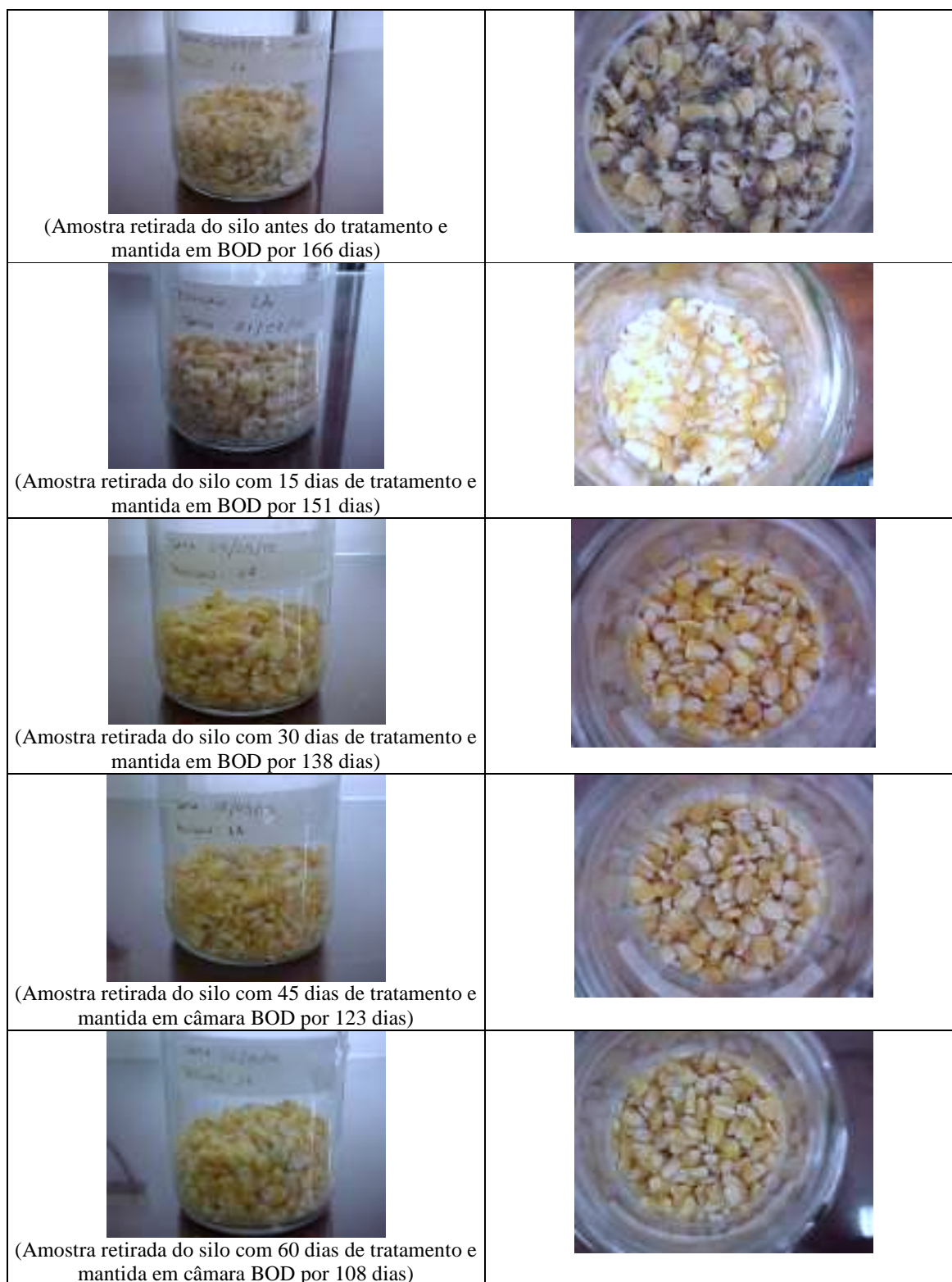


Figura 46- Fotografias mostrando a condição final das amostras do milho retiradas do silo durante o período experimental e mantidas em câmara BOD até o dia 20/01/01.

## 5 - RESUMO E CONCLUSÕES

O experimento foi realizado na Área de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. Construiu-se um protótipo (equipamento Gerador de CO<sub>2</sub>) com o objetivo de maximizar a produção de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e o consumo de oxigênio (O<sub>2</sub>), por meio da queima de carvão vegetal, visando a utilização da atmosfera gerada no controle de pragas que infestam os produtos agrícolas armazenados. O protótipo foi acoplado a um silo cilíndrico semi-hermético, cuja estrutura foi construída integralmente em ferro-cimento, com capacidade estática de aproximadamente 38 t de milho, que é normalmente encontrada nas pequenas propriedades agrícolas.

Os objetivos deste trabalho foram desenvolver um equipamento modificador de atmosfera visando o controle da atividade de insetos em grãos armazenados em silos convencionais (adaptados para reterem os gases), pela produção de uma atmosfera letal ou desfavorável ao desenvolvimento das pragas; avaliar o equipamento Gerador de CO<sub>2</sub>, em nível de campo, no controle de todas as fases de desenvolvimento do *S. zeamais* presente no milho armazenado em um silo semi-hermético; e, também, avaliar o efeito da atmosfera produzida pelo equipamento na qualidade fisiológica e química do milho.

Para a produção de uma atmosfera letal ou desfavorável ao desenvolvimento das pragas que infestam os grãos armazenados, construiu-se um protótipo capaz de alterar, por meio da combustão do carvão vegetal, o ar atmosférico intergranular do interior do silo experimental. O protótipo foi constituído, basicamente, de uma fornalha para a combustão

do carvão vegetal; de um trocador de calor (composto por um radiador e um ventilador axial), com finalidade de diminuir a temperatura dos gases provenientes da câmara de combustão da fornalha; de um sistema de refrigeração, com o objetivo de diminuir a umidade relativa dos gases; e de um ventilador centrífugo, responsável pela injeção dos gases produzidos pelo equipamento Gerador de CO<sub>2</sub>, no interior do silo experimental. Para avaliar o protótipo e seus componentes, sensores para leitura das concentrações de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> e de temperaturas foram instalados no equipamento e no silo experimental. O equipamento foi acoplado ao silo experimental, e dois procedimentos operacionais foram avaliados: funcionando o sistema com recirculação dos gases e sem recirculação dos gases.

Para avaliar o efeito da atmosfera produzida pelo protótipo no controle de pragas que infestam os produtos agrícolas armazenados, 27 t de milho infestado com *S. zeamais* foram armazenadas no silo experimental. O produto ficou durante dois meses sob efeito da atmosfera produzida pelo equipamento Gerador de CO<sub>2</sub>. A injeção dos gases produzidos pelo protótipo no interior do silo, durante esse período, foi realizada a cada sete dias, perfazendo um total de oito aplicações. Amostras do produto armazenado foram retiradas de diferentes pontos do silo, a cada 15 dias, para contagem do número de insetos vivos ou mortos, sendo uma amostragem realizada no início do experimento, antes da aplicação dos gases. A contagem de insetos de cada amostra foi realizada após permanecerem por 36 dias, a 27°C, em câmara climática do tipo BOD.

Para avaliação do efeito da atmosfera produzida pelo protótipo sob as qualidades fisiológica e química do milho armazenado, amostras iniciais e finais do produto foram retiradas do silo e analisadas nos laboratórios de Pré-Processamento de Produtos Agrícolas (Departamento de Engenharia Agrícola) e de Tecnologia do Amido (Departamento de Tecnologia de Alimentos). As análises realizadas avaliaram a umidade, o teor de impurezas, o índice de vigor, a percentagem de germinação e a percentagem de infestação do milho, bem como o índice de absorção de água, o poder de inchamento, o índice de solubilização e as características amilográficas da farinha do milho.

As análises dos dados e a interpretação dos resultados obtidos permitiram as seguintes conclusões:

- No tocante ao O<sub>2</sub>, a concentração média obtida no interior do silo (4,0% em volume), nas cinco primeiras semanas do experimento, foi adequada para controlar as

pragas que infestam os grãos armazenados. Assim, o equipamento desenvolvido mostrou ser capaz de produzir uma atmosfera desfavorável aos insetos, em razão do efeito sinérgico da baixa concentração de O<sub>2</sub> e da relativamente alta concentração de CO<sub>2</sub>.

- A utilização da atmosfera produzida pelo equipamento teve efeito de diminuir a proliferação do *S. zeamais* na massa de grãos armazenada no silo, reduzindo o seu desenvolvimento normal. Em relação à percentagem de infestação inicial do produto, houve aumento de 2,5 pontos percentuais ao longo de dois meses de armazenamento do milho sob efeito da atmosfera gerada pelo equipamento e de 6,5 pontos percentuais para o milho não-tratado.

- A partir do trigésimo dia sob efeito da atmosfera produzida pelo equipamento, a geração F1 do *S. zeamais* teve reduzido a sua postura e, conseqüentemente, o seu desenvolvimento, resultando em um controle de aproximadamente 91,1% na geração F2.

- A concentração média de CO<sub>2</sub> produzida na fornalha do protótipo foi de aproximadamente 13,4%, resultando em uma eficiência de conversão do oxigênio em dióxido de carbono de cerca de 63,6%. Essa concentração média ficou aquém da mínima necessária para o controle total das pragas que infestam os grãos armazenados; entretanto, ela tem efeitos positivos indiretos no controle dos insetos, como aumentar a sua respiração e causar a abertura dos seus espiráculos, podendo levar a perda de água, dessecação e morte.

- Com relação à produção de CO<sub>2</sub>, a fornalha apresentou comportamento semelhante, quando operada com ou sem recirculação dos gases. No entanto, recomenda-se, quando da utilização do equipamento Gerador de CO<sub>2</sub> no controle de pragas de grãos armazenados, que a primeira operação do protótipo seja realizada com recirculação dos gases e que, a partir da segunda operação, o sistema funcione utilizando o ar atmosférico como fonte de oxigênio para queimar o combustível.

- A atmosfera intergranular produzida pelo equipamento Gerador de CO<sub>2</sub> controlou satisfatoriamente a infestação do *S. zeamais* presente no milho armazenado no silo. Os resultados obtidos no controle do inseto demonstram a viabilidade técnica da utilização de equipamentos geradores de CO<sub>2</sub> no controle de pragas de grãos armazenados em silos semi-herméticos.

- Não houve efeito significativo do tratamento a que o produto foi submetido no silo no índice de vigor e na germinação do milho.

- Em termos de qualidade, o milho sob efeito da atmosfera produzida pelo protótipo apresentou melhores índices característicos de inferência de qualidade, quando comparado com o milho armazenado sob condições climáticas normais.

- Apesar das medidas iniciais realizadas com o objetivo de vedar o silo, trocas gasosas entre o interior do silo e o meio ambiente aconteceram. Portanto, houve necessidade de acionamento do equipamento Gerador de CO<sub>2</sub> em intervalos predeterminados de tempo (sete dias), visando recompor a atmosfera produzida pelo protótipo.

- No que se refere à distribuição dos gases no interior do silo, há tendência de maior concentração de O<sub>2</sub> próximo à parede do silo e de CO<sub>2</sub> na base deste, porém, em termos práticos, pode-se considerar a ocorrência de uma distribuição uniforme dos gases na atmosfera intergranular do milho armazenado. Essa distribuição uniforme ocorreu no período de 24 h após a injeção dos gases no interior do silo.

- O trocador de calor utilizado no equipamento Gerador de CO<sub>2</sub>, composto pelo radiador e ventilador axial, foi eficiente em sua finalidade, isto é, diminuir a temperatura dos gases provenientes da fornalha para valores próximos aos da temperatura ambiente, de forma que estes pudessem ser injetados no interior do silo em condições favoráveis à conservação do produto armazenado.

- O sistema de refrigeração foi eficiente em diminuir a temperatura dos gases provenientes do trocador de calor, porém, em relação à diminuição da umidade relativa, ele se mostrou eficiente somente para vazões dos gases inferiores a 0,4 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>.

- Os consumos específicos de carvão vegetal pela fornalha foram de 63 g.h<sup>-1</sup>.m<sup>-3</sup> e 126 g.h<sup>-1</sup>.m<sup>-3</sup> de milho, respectivamente para vazões médias dos gases de 0,31 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> e 0,74 m<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup>. Esses consumos específicos, que podem ser considerados baixos, indicam a viabilidade econômica de utilizar o equipamento, visto que o carvão vegetal é encontrado comercialmente com facilidade, a preços acessíveis.

- O equipamento funcionou adequadamente à finalidade proposta, porém há necessidade de padronização da operação do sistema, com o objetivo de substituir os equipamentos eletrônicos que fornecem, em tempo hábil, as concentrações de CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub>,

pois o processo de operação é dinâmico, necessitando de controlar as entradas e saídas dos gases no sistema.

- O desenvolvimento comercial de equipamentos similares, geradores de CO<sub>2</sub>, estimulado pela operação padronizada, poderá substituir os monitores eletrônicos, diminuindo os custos de aquisição de tais equipamentos.

## 6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALAGUSUNDARAM, K., JAYAS, D.S., MUIR, W.E., WHITE, N.D.G., SINHA, R.N. Distribution of introduced carbon dioxide through wheat bulks contained in bolted-metal bins. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v.38, n.3, p.895-901, 1995.
- ALAGUSUNDARAM, K., JAYAS, D.S., MUIR, W.E., WHITE, N.D.G. Convective-diffusive transport of carbon dioxide through store-grain bulks. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v.39, n.4, p.1505-1510, 1996a.
- ALAGUSUNDARAM, K., JAYAS, D.S., MUIR, W.E., WHITE, N.D.G., SINHA, R.N. Finite element model of three-dimensional movement of carbon in grains bins. **Canadian Agric. Eng.** 1996b.
- AL-YAHYA, S.A., BERN, C.J., MISRA, M.K., BAILEY, T.B. Carbon dioxide evolution of fungicide-treated high-moisture corn. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v.36, n.5, p.1417-1422, 1993.
- ANDRADE, E.B., SASSERON, J.L., OLIVEIRA FILHO, D. **Princípios sobre combustíveis, combustão e fornalhas**. Viçosa, MG: CENTREINAR, 1984. 40p.
- ANNIS, P.C., DAMCEVSKI, K.A., REUSS, R. **Moisture content and grain respiration**. Canberra, Australia: CSIRO, 1997. (CSIRO Entomology Report of Research 1993 – 95; <http://www.ento.csiro.au/research/storprod/storprod.html>).
- ANNIS, P.C., DOWSETT, H. **Controlled atmospheres**. Canberra, Australia: CSIRO, 1995. (<http://www.ento.csiro.au/research/storprod/storprod.html>).

- ANNIS, P.C., MORTON, R. The acute mortality effects of carbon dioxide on various life stages of *Sitophilus oryzae*. **J. Stored Prod. Res.**, v.33, p.115-124, 1997.
- ANNIS, P.C. **Rapid phosphine fumigation on-farm?** Canberra, Australia: CSIRO, 1998. (<http://www.ento.csiro.au/research/storprod/storprod.html>).
- BAILEY, S.W. Airtight storage of grain; its effect on insect pests. I - *Calandra granaria* L. (Coleoptera, Curculionidae). **Aust. J. Agric. Res.**, v.6, p.35-51, 1955.
- BAILEY, S.W. Airtight storage of grain; its effect on insect pests. III - *Calandra granaria* L. (large strain). **Aust. J. Agric. Res.**, v.8, p.595-603, 1957.
- BAILEY, S.W. Air-tight storage of grain; its effect on insect pests. IV - *Rhyzopertha dominica* (F.) and some other Coleoptera that infest stored grain. **J. Stored Prod. Res.**, v.1, p.25-33, 1965.
- BAILEY, S.W., BANKS, H.J. A review of recent studies of the effects of controlled atmospheres on stored product pests. In: SHEJBAL, J. (Ed.). Amsterdam: Elsevier. **Int. Symp. On Controlled atmospheres storage of grains**. Costelgandolfo, Italy, 1980. p.101-118.
- BANKS, H.J. Current methods and potential systems for production of controlled atmospheres for grain storage. In: International Symposium Practical Aspects of Controlled Atmosphere and Fumigation in Grain Storages. **Proceedings...** Perth, Australia. 1984. p.523-542.
- BANKS, H.J., ANNIS, P.C. **Suggested procedures for controlled atmosphere storage of dry grain**. In: Commonwealth. Sci. Ind. Res. Org. (CSIRO), Canberra, Australia, 1977. 23p. (Paper n°13).
- BANKS, H.J., ANNIS, P.C. Conversion of existing grain storage structures for modified atmosphere use. In: SHEJBAL, J. (Ed.). Amsterdam: Elsevier. **Int. Symp. On Controlled atmospheres storage of grains**. Costelgandolfo, Italy, 1980. p.461-474.
- BELL, C.H. Effects of oxygen on the toxicity of carbon dioxide to storage insects. Controlled atmosphere and fumigation in grain storages. In: International Symposium Practical Aspects of Controlled Atmosphere and Fumigation in Grain Storages, **Proceedings...** Perth, Australia. 1984. p.67-70.
- BOND, E.J., BUCKLAND, C.T. Development of resistance of carbon dioxide in the Granary Weevil. **J. Econ. Entomology**, v.72, p.770-771, 1979.
- BOND, E.J., MILLER, D.M. A new technique for measuring the combustibility of gases at reduced pressures and its application to the fumigant phosphine. **J. Stored Prod. Res.**, v.24, p.225-228, 1988.

- BRASIL, 1992. **Regras para análise de sementes**. Ministério da Agricultura, Brasília, DF. 1992. 365p.
- BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, E.W., HALL, C.W. **Drying cereal grains**. In: The AVI Publishing Company, Westport, Connecticut, 1974. 265p.
- CALDERON, M., NAVARRO, S. Increased toxicity of low oxygen atmospheres supplemented with carbon dioxide on *Tribolium castaneum* adults. **Ent. Exp. Appl.**, v.25, p.39-44, 1979.
- CALDERON, M., NAVARRO, S. Synergistic effect of CO<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> mixtures on two stored grain pests. In: SHEJBAL, J. (Ed.). Amsterdam: Elsevier. **Int. Symp. On Controlled atmospheres storage of grains**. Costelgandolfo, Italy, 1980. p.79-84.
- CASELLA, T.L.C. **Dióxido de carbono associado a fosfina no controle de *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) em grãos armazenados**. Viçosa, MG: UFV, 1998. 82p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1998.
- CETEC. Fundação Centro Tecnológico de Minas Gerais. **Teoria simplificada da combustão**. Belo Horizonte, M.G. 1988. 30p.
- CHAPMAN, R.F. Gaseous exchange. In: R.F. Chapman (ed) **The Insects: Structure and Function**, 4<sup>th</sup> ed. Cambridge University, Cambridge, UK. 1998. p.441-478.
- CHRISTENSEN, C.M. Storage fungi. In: BENCHAT, L. **Food Beverage Mycology**, Westport A.V.I. 1978. 197p.
- CHOI, C.Y., WALLER, P.M., DENNEHY, T.M. Insect control with carbon dioxide foam. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v.40, n.5, p.1475-1480, 1997.
- COELHO, E.M. **Eficácia da mistura dióxido de carbono – fosfina no controle de *Sitophilus zeamais* e *Tribolium castaneum* em função do período de exposição**. Viçosa, MG: UFV, 1999. 96p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, 1999.
- COFIE-AGBLOR, R., MUIR, W.E., JAYAS, D.S., WHITE, N.D.G. Carbon dioxide sorption by grains and canola at two CO<sub>2</sub> concentrations. **J. Stored Prod. Res.**, v.34, p.159-170, 1998.
- CORTEZ, L.A.B., LORA, E.S. **Tecnologias de conversão energética da biomassa**. Manaus, AM: Ed. EDUA/EFEI, 1997. 540p. (Série: Sistemas Energéticos, v.2).
- ELLIS, D.M. Engineering aspects to be incorporated into design of new storages and modification of storages for controlled atmosphere. In: International Symposium

Practical Aspects of Controlled Atmosphere and Fumigation in Grain Storages. **Proceedings...** Perth, Australia. 1984. p.237-245.

ENGELHARD SENSOR TECHNOLOGIES. **Background on CO<sub>2</sub> control and ASHRAE 62-1989**. [1999]. ([http://www.telaire.com/w\\_co2energy.htm](http://www.telaire.com/w_co2energy.htm)).

EVANGELISTA, J. **Tecnologia de alimentos**. In: Livraria Atheneu Editora. 1<sup>a</sup> ed., 1989. 652p.

DESMARCHELIER, J.M., WOHLGEMUTH, R. Response of several species of insects to mixtures of phosphine and carbon dioxide. In: International Symposium Practical Aspects of Controlled Atmosphere and Fumigation in Grain Storages. **Proceedings...** Perth, Australia. 1984. p.75-81.

DESMARCHELIER, J. **The search for alternative fumigants**. Canberra, Austrália: CSIRO, 1997. (<http://www.ento.csiro.au/research/storprod/storprod.html>).

FIELDS, P.G. The control of stored-product insects and mites with extreme temperatures. **J. Stored Prod. Res.**, v.28, p.89-118, 1992.

GRAVER, J.S. van S. Fumigation on controlled atmosphere as components of integrated commodity management in the tropics. In: CHAMP, B.R., HIGHLEY, E., BANKS, H.J. (Eds.) **Fumigation and controlled atmosphere storage of grain**. Singapore: ACIAR, 1990. p.38-52.

GWINNER, J., HARNISCH, R., MUCK, O. Manual of the prevention of post-harvest grain losses. In: GTZ, Eschborn, Germany. 1996. 338p.

JAY, E.G. Methods of applying carbon dioxide for insect control in stored grain. In: SHEJBAL, J. (Ed.). Amsterdam: Elsevier. **Int. Symp. On Controlled atmospheres storage of grains**. Costelgandolfo, Italy, 1980. p.225-234.

JAYAS, D.S., MUIR, W.E., WHITE, N.D.G. **Modeling the diffusion of carbon dioxide in stored grain**. St. Joseph, Michigan. 1988. (ASAE Paper n<sup>o</sup> 88-6013).

KRISHNAMURTY, T.S., SPRATT, E.C., BELL, C.H. The toxicity of carbon dioxide to adult beetles in low oxygen atmospheres. **J. Stored Prod. Res.**, v.22, p.145-151, 1986.

LINDGREN, D.L., VINCENT, L.E. Effect of atmospheric gases alone or in combination on the mortality of granary and rice weevils. **J. Econ. Entomol.**, v.63, p.1926-1929, 1970.

LOCATELLI, D.P., DAOLIO, E. Effectiveness of carbon dioxide under reduced pressure against some insects infesting packaged rice. **J. Stored Prod. Res.**, v.29, p.81-87, 1993.

- MANN, D.D., JAYAS, D.S., WHITE, N.D.G., MUIR, W.E. Sealing of welded-steel hopper bins for fumigation of stored grain with carbon dioxide. **Canadian Agric. Eng.**, v.39, n.2, p.91-97. 1997.
- MANN, D.D., JAYAS, D.S., MUIR, W.E., WHITE, N.D.G. Efficient carbon dioxide fumigation of wheat in welded-steel hopper bins. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v.15, n.1, p.57-63. 1999.
- MARZKE, F.O., PRESS, A.F., PEARMAN, G.C. Mortality of rice weevil, Indian-meal moth, and *Trogoderma glabrum* exposed to mixtures of atmospheric gases at various temperatures. **J. Econ. Entomol.**, v.63, p.570-574, 1970.
- MITCHAM, E.J., ZHOU, S., BIKOBA, V. Controlled atmospheres for quarantine control of three of table grape. **J. Econ. Entomol.**, v.90, n.5, p.1361-1370, 1997.
- MUELLER, D.K. A new method of using low levels of phosphine in combination with heat and carbon dioxide. In: International Working Conference on Stored Product Protection, 6, 1994, Canberra, Australia, **Proceedings...** Canberra, Australia. 1994.
- NAVARRO, S. The effects of low oxygen tensions on three stored-product insect pests. **Phytoparasitica**, v.6, p.51-58, 1978.
- NAVARRO, S., JAY, E.G., LEESCH, J.G. Recirculation rate requirements for adequate distribution of carbon dioxide in grain bins. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v.29, n.5, p.1348-1354. 1986.
- NICOLAS, G., SILLANS, D. Immediate and latent effects of carbon dioxide to insects. **Ann. Ver. Entomol.**, v.34, n.1, p.97-116. 1989.
- NOYES, R.T. **Grain storage systems of the future**. [199-]. (<http://www.geaps.com/proceedings/1997/11.htm>).
- OXLEY, T.A., WICKENDEN, G. The effect of restricted air supply on some insects which infest grain. **Ann. Appl. Biol.**, v.51, p.313-324. 1963.
- PEREIRA, J. **Mudança na qualidade tecnológica de grãos de arroz (*Oryza sativa* L.) armazenados com casca e polidos**. Viçosa, MG: UFV, 1996. 118p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, 1996.
- PITT, R.E. A model of aflatoxin formation in stored products. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v.38, n.5, p.1445-1453. 1995.

- PRICE, L.A., MILLS, K.A. The toxicity of phosphine to the immature stages of resistant and susceptible strains of some common stored product beetles, and implications for their control. **J. Stored Prod. Res.**, v1, p.51-59. 1988.
- REICHMUTH, C. **Controlled atmospheres in stored product protection**. Federal Biological Research Centre for Agriculture and Forestry. Institute for Stored Product Protection. Berlin, Alemanha. 1990.
- SEMPLE, R.L, HICKS, P.A., LOZARE, J.V., CASTEMANS, A. **Towards integrated commodity and pest management in grain storage**. In: REGNET Publication – NAPHIRE/FAO, Rome, Italy. 1992. 526p.
- SHEJBAL, J. Storage of cereal grains in nitrogen atmosphere. **Cereal Foods World**, v.24, p.192-194. 1979.
- SHEJBAL, J. Storability of cereal grains and oil seeds in nitrogen. In: SHEJBAL, J. (Ed.). Amsterdam: Elsevier. **Int. Symp. On Controlled atmospheres storage of grains**. Costelgandolfo, Italy, 1980. p.185-205.
- SILVA, J.S. **Secagem e armazenagem de produtos agrícolas**. Ed. Aprenda Fácil, Viçosa. MG. 2000. 502p.
- SPRATT, E., DIGNAM, G., BANKS, H.J. The effect of high concentrations of carbon dioxide in air on *Trogoderma granarium* Everts (Coleoptera: Dermestidae). **J. Econ. Entomol.**, v.84, p.1933-1942, 1985.
- STEELE, J.L., SAUL, R.A., HUKILL, W.V. Deterioration of shelled corn as measured by carbon dioxide production. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, Michigan, v.12, n.5, p.685-689. 1969.
- STOREY, C.L. Exothermic inert-atmosphere generators for control of insects in stored wheat. **J. Econ. Entomol.**, v.66, p.511-514, 1973.
- STOREY, C.L. Mortality of adult stored-product insects in an atmosphere produced by an exothermic inert-atmosphere generator. **J. Econ. Entomol.**, v.68, p.316-318, 1975.
- SUBRAMANYAM, B., HAGSTRUM, D.W. **Alternatives to pesticides in stored-product**. In: Kluwer Academic Publishers, London, UK. 2000. 437p.
- TRANCHINO, L., AGOSTINELLI, P., CONSTANTINI, A. SHEJBAL, J. The first Italian large scale facilities for the storage of cereal grains in nitrogen. In: SHEJBAL, J. (Ed.). Amsterdam: Elsevier. **Int. Symp. On Controlled atmospheres storage of grains**. Costelgandolfo, Italy, 1980. p.445-459.
- WELLER, G. **Methyl bromide: the story so far**. Canberra, Austrália: CSIRO, 1997. (<http://www.ento.csiro.au/research/storprod/storprod.html>).

- WHITE, N.D.G., JAYAS, D.S. Control of insects and mites with carbon dioxide in wheat stored at cool temperatures in nonairtight bins. **J. Econ. Entomol.**, v.84, n.6, p.1933-1942, 1991.
- WHITE, N.D.G., JAYAS, D.S., SINHA, R.N. Carbon dioxide as a control agent for the rusty grain beetle (Coleoptera: Cucujidae) in stored wheat. **J. Econ. Entomol.**, v.83, n.1, p.277-288. 1990.
- WHITE, N.D.G., JAYAS, D.S., DEMIANYK, C.J. Alternatives to methyl bromide for space fumigation and commodity treatment. **Workshop on Methyl Bromide Alternatives**, Toronto. 1996.
- WHITING, D.C., HEUVEL, J. Van Den. Oxygen, carbon dioxide, and temperature effects on mortality responses of diapausing *Tetranychus urticae* (Acari: Tetranychidae). **J. Econ. Entomol.**, v.88, n.2, p.331-336, 1995.
- WHITTLE, C.P., ANNIS, P.C., WATERFORD, C.J., BANKS, H.J. **Carbon monoxide in stored grain**. Canberra, Australia: CSIRO, 1999. (<http://www.ento.csiro.au/research/storprod/storprod.html>).

## APÊNDICE A

Quadro 1 - Concentrações de dióxido de carbono e oxigênio, e velocidade e vazão dos gases injetados no silo (teste experimental 1 - realizado em 08/08/2000)

Tempo (min)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	Velocidade (m/s)	Vazão Gases (m <sup>3</sup> /min)
0	13,3	3,8	0,75	0,33
10	14,5	1,5	0,90	0,40
20	15	1,6	0,85	0,38
30	15,5	1,9	0,85	0,38
40	15,8	1,8	0,80	0,35
50	15,3	2,4	0,80	0,35
60	15,3	2,7	0,75	0,33
70	15	3	0,80	0,35
80	15	2,8	0,80	0,35
90	14,8	3,3	0,80	0,35
100	14,3	3,9	0,80	0,35
110	13,7	3,7	0,85	0,38

Quadro 2 - Concentrações de dióxido de carbono e oxigênio, e velocidade e vazão dos gases injetados no silo (teste experimental 2 - realizado em 15/08/2000)

Tempo (min)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	Velocidade (m/s)	Vazão Gases (m <sup>3</sup> /min)
0	12,9	0	0,80	0,35
5	12,7	2,6		
10	11,6	3,8	0,85	0,38
15	11,3	4,1	0,80	0,35
20	13	1,6	0,85	0,38
30	13	2,5	0,80	0,35
35	12,5	3,4		
40	11,7	4	0,80	0,35
52	12,2	0	0,80	0,35
57	13	2,6		
62	12,1	3,4	0,80	0,35
67	11,7	3,9		
70	14,4	0	0,75	0,33
75	14,1	0		
80	14	0	0,75	0,33
85	13,4	0		
90	13,2	0	0,75	0,33
95	12,8	0,4		
100	12,9	0,6	0,70	0,31
105	12,8	2,5	0,70	0,31

Quadro 3 - Concentrações de dióxido de carbono e oxigênio, e velocidade e vazão dos gases injetados no silo (teste experimental 3 - realizado em 22/08/2000)

Tempo (min)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	Velocidade (m/s)	Vazão Gases (m <sup>3</sup> /min)
0	14,6	2,3	0,75	0,33
10	15,4	1,8	0,75	0,33
20	15,1	1,8	0,70	0,31
30	15,1	1,8	0,65	0,29
40	15	1,5	0,65	0,29
45	14,7	1,7		
50	14,9	2	0,65	0,29
55	14,3	2,6		
60	13,9	3,3	0,60	0,27
65	14,2	2,5		
70	13,9	3,1	0,60	0,27
75	13,6	4,6	0,60	0,27

Quadro 4 - Concentrações de dióxido de carbono e oxigênio, e velocidade e vazão dos gases injetados no silo (teste experimental 4 - realizado em 29/08/2000)

Tempo (min)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	Velocidade (m/s)	Vazão Gases (m <sup>3</sup> /min)
0	12,2	0,5	0,70	0,31
5	13,6	1,1		
10	13,9	0,7	0,75	0,33
15	14	0,2		
20	14,3	0	0,75	0,33
25	14,8	0		
30	14,6	0,8	0,70	0,31
35	14,1	0,9		
40	14,2	1,6	0,75	0,33
45	13,9	2,4		
50	12,3	2,7	0,60	0,27
75	14,6	1,8		
80	14,8	0,7	0,65	0,29
85	14,1	0		
90	14,6	2,5	0,75	0,33
95	15,1	3,6		
100	15,2	4	0,70	0,31
105	15	3,6		
110	14,8	3,9	0,70	0,31
115	14,9	2,3		
120	14,8	2,6	0,65	0,29
125	14,3	2,4		
130	13,9	2,5	0,60	0,27
135	13,1	2,9		
140	13,3	2,6	0,60	0,27
145	13,3	3,8		
150	13,4	2,5	0,60	0,27
155	12,6	3,5		

Quadro 5 - Concentrações de dióxido de carbono e oxigênio, e velocidade e vazão dos gases injetados no silo (teste experimental 5 - realizado em 05/09/2000)

Tempo (min)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	Velocidade (m/s)	Vazão Gases (m <sup>3</sup> /min)
0	14	2,8	0,65	0,29
5	14	2,7		
10	14,5	3,2	0,60	0,27
15	14,4	2,8		
20	14,1	3,4	0,65	0,29
25	14,2	3,6		
30	14,1	3,5	0,55	0,24
35	14,4	3,3		
40	14,3	2,9	0,65	0,29
45	14,3	2,6		
50	14,4	2,4	0,65	0,29
65	15,2	3		
70	15	1,7	0,65	0,29
75	14,9	1,6		
80	15	2,6	0,60	0,27
85	15,1	2,9		
90	15,4	3	0,50	0,22
95	15,2	2,6		
100	15	2	0,50	0,22
105	14,5	1,9		
110	14,7	1,6	0,50	0,22
115	13,7	1,5		
120	14	1,5	0,50	0,22
125	13,5	1,5		
130	13,4	1,2	0,50	0,22
135	13,5	2		
140	13,7	2,4	0,50	0,22
145	13,2	2,5		
150	13,1	2,9	0,50	0,22

Quadro 6 - Concentrações de dióxido de carbono e oxigênio, e velocidade e vazão dos gases injetados no silo (teste experimental 6 - realizado em 12/09/2000)

Tempo (min)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	Velocidade (m/s)	Vazão Gases (m <sup>3</sup> /min)
0	14	0	3,00	1,33
10	14	0	2,50	1,11
15	13	0		
20	13	3,7	1,50	0,66
30	11	10	2,50	1,11
35	13	5,3	2,50	1,11
55	14	0	2,50	1,11
60	13	0	2,00	0,89
65	13	2	2,00	0,89
70	14	2	2,00	0,89
75	13	3,2	2,00	0,89
80	12	3,6	1,25	0,55
85	13	1,7	2,00	0,89
90	11	3,4	2,00	0,89

Quadro 7 - Concentrações de dióxido de carbono e oxigênio, e velocidade e vazão dos gases injetados no silo (teste experimental 7 - realizado em 19/09/2000)

Tempo (min)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	Velocidade (m/s)	Vazão Gases (m <sup>3</sup> /min)
0	12	0	1,50	0,66
10	12,2	0	1,50	0,66
20	12	0,5	1,50	0,66
30	12,6	3	1,25	0,55
40	11,4	4,2	1,25	0,55
55	12,4	3	1,25	0,55
65	13,4	2,4	1,25	0,55
75	12,6	3,3	1,25	0,55
85	12,2	3,6	1,25	0,55
95	11,8	4,7	1,00	0,44
105	11,6	4,5	1,00	0,44

Quadro 8 - Concentrações de dióxido de carbono e oxigênio, e velocidade e vazão dos gases injetados no silo (teste experimental 8 - realizado em 26/09/2000)

Tempo (min)	CO <sub>2</sub> (%)	O <sub>2</sub> (%)	Velocidade (m/s)	Vazão Gases (m <sup>3</sup> /min)
0	12,6	0,7	1,75	0,78
10	12,2	0	1,75	0,78
20	12	1,2	1,50	0,66
30	12	1,7	1,50	0,66
40	11,5	4,6	1,50	0,66
45	10,5	6,6	1,25	0,55
55	13,2	0,2	2,00	0,89
60	12,8	0	2,00	0,89
70	12,6	0,8	1,50	0,66
80	11,6	2,5	1,50	0,66
85	11	5,4	1,50	0,66

Quadro 9 - Concentrações de dióxido de carbono e de oxigênio no interior do silo (teste experimental 1)

<i>DIÓXIDO DE CARBONO</i>																						
Posição de amostragem	Horário de leitura (horas)																					
	18:00	21:00	0:00	3:00	6:00	9:00	12:00	15:00	18:00	0:00	6:00	12:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00
1C	13,7	13	12,9	12,8	13	12,7	12,2	11,7	11,8	12,4	12,4	12,2	12,8	12,2	11	11,5	11,5	12	11,6	11,9	11,9	11,5
1M	14,6	14,1	13,5	13,1	13,3	12,8	12,6	13	12,6	13,1	13,2	12,8	12,9	12,5	13,2	12,5	12,5	12,8	12,5	12,8	12,4	12,3
2C	14,2	13,8	13,2	12,9	12,8	12,7	12,7	12,1	12,5	12,6	12,5	12,2	12,8	12,3	12,1	12,1	12,6	12	12,1	12,1	12,1	11,8
2M	14,6	13,6	13,2	12,4	12,6	12,5	12,7	12,7	12,2	12,1	12,2	12,1	12,8	12,1	12,5	11,3	12	11,8	11,9	11,8	11,8	11,7
2P	13,9	13	13	12,6	12,5	12,3	12,4	11,8	12,2	12	12,3	11,7	12	11,7	12	11,6	11,3	11,9	11,4	11,6	11,6	11,6
3C	14,7	14,2	13,5	13,7	13,2	13,1	12,8	12,6	12,7	13	13	12,6	13,2	12,7	13	12,7	12,4	12,7	12,2	12,3	12,1	12,1
3M	14,9	14,6	13,2	12,8	13,1	12,6	12,5	12,7	12,9	12,6	12,9	12,3	13	12,1	13,2	12	12	11,8	12	11,9	12	11,6
3P	14,1	12,9	13	13,1	13,1	12,3	12,5	12	12,1	12,1	12,2	11,9	12,4	11,9	12,2	12,1	11,8	11,9	11,6	11,7	11,7	11,3
4C	13,1	13,5	13,3	13	12,9	12,8	12,6	12,2	12,2	12,2	12,1	12	11,9	12	12,2	12	11,6	11,8	11,6	11,8	11,4	11,6
4M	13,1	13,6	13,4	13,1	13,1	12,7	12,5	12,6	12	11,8	12,3	12	11,8	12,1	12,1	12	11,7	11,8	11,6	11,7	11,6	11,6
4P	13	13,5	13,3	13	13	12,6	12,5	12,4	12,1	11,7	12,4	11,8	11,9	12	12	12,1	11,5	11,7	11,6	11,8	11,5	11,7
Concentração Média	14,0	13,6	13,2	13,0	13,0	12,6	12,5	12,3	12,3	12,3	12,5	12,1	12,5	12,1	12,3	12,0	11,9	12,0	11,8	11,9	11,8	11,7
<i>OXIGÊNIO</i>																						
Posição de amostragem	Horário de leitura (horas)																					
	18:00	21:00	0:00	3:00	6:00	9:00	12:00	15:00	18:00	0:00	6:00	12:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00
1C	3,7	4,8	4,8	4,6	4,6	4,5	4,8	5,4	4,8	4,5	4,4	4	3,7	3,9	5,9	5,1	5,1	4,7	4,7	4,4	3,7	4,6
1M	3,4	3,1	3,7	3,9	4	4	3,9	3,8	3,9	3,7	3,7	3,5	3,1	3,4	2,8	3,8	3,5	3,7	3,4	3,6	3,2	3,6
2C	4	4	4,3	4,4	4,4	4,4	4,4	4,6	4,5	4,3	4,3	4	3,5	3,8	4,4	4,4	4,3	4,4	3,9	4,2	3,6	4,2
2M	3,3	3,7	4,1	4,4	4,4	4,3	4,3	4,1	4,2	4,5	4,4	4	3,6	3,9	3,3	4,3	4,1	4,4	4	4,2	3,7	4,1
2P	2,8	4,6	4,5	4,5	4,6	4,6	4,4	4,6	4,5	4,8	4,6	4,4	4,3	4,3	4,2	4,5	4,8	4,6	4,6	4,5	4,3	4,4
3C	3,1	3,3	3,8	4,1	4,1	4,2	4,1	4,1	4	3,9	3,9	3,7	3,2	3,5	2,9	3,9	3,8	4,1	3,6	3,9	3,5	4
3M	3,1	2,9	3,9	4,2	4,3	4,3	4,2	4	3,9	4,2	4,2	3,9	3,2	3,9	2,9	4,2	4	4,4	3,8	4,2	3,7	4,2
3P	3,5	4,7	4,4	4,4	4,5	5,2	4,4	5,1	4,6	4,8	4,7	4,2	4,2	4,2	4,1	4,4	4,5	4,6	4,4	4,4	4,1	4,4
4C	4,2	4,2	4,4	4,4	4,5	4,4	4,4	4,4	4,5	4,7	4,6	4,3	4,6	4,3	3,9	4,4	4,6	4,6	4,4	4,4	4,2	4,4
4M	4,3	4,2	4,3	4,5	4,5	4,4	4,4	4,3	4,6	4,8	4,6	4,3	4,5	4,2	3,9	4,4	4,6	4,7	4,4	4,4	4,1	4,4
4P	4,3	4,2	4,3	4,4	4,5	4,6	4,4	4,4	4,6	4,8	4,6	4,4	4,5	4,2	4	4,4	4,6	4,6	4,5	4,4	4,2	4,4
Concentração Média	3,6	4,0	4,2	4,3	4,4	4,4	4,3	4,4	4,4	4,5	4,4	4,1	3,9	4,0	3,8	4,3	4,4	4,4	4,2	4,2	3,8	4,2

Quadro 10 - Concentrações de dióxido de carbono e oxigênio no interior do silo (teste experimental 2)

<i>DIÓXIDO DE CARBONO</i>															
Posição de amostragem	Horário de leitura (horas)														
	18:00	0:00	6:00	12:00	18:00	6:00	18:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00
1C	12,6	11,5	11,7	11,3	10,5	11	10,8	10,9	10,6	10,6	10,6	10,5	10,2	10,5	10,2
1M	13,3	12,3	11,9	11,5	11,5	11,3	11,3	11,2	11,1	11	11,1	11,1	11,1	10,8	10,8
2C	12,4	11,8	11,9	11,3	11,1	11	11	10,7	10,7	10,7	10,5	10,6	10,5	10,5	10,2
2M	12,9	11,8	11,9	11,2	11,3	10,7	10,8	10,7	10,5	10,6	10,4	10,5	10,1	10,4	10
2P	11,6	12	11,7	11,2	10,9	10,6	10,5	10,4	10,4	10,2	10,1	9,8	10	10	9,8
3C	13	12	11,7	11,2	11,6	11,1	10,9	10,9	10,9	10,8	10,8	10,7	10,7	10,6	10,3
3M	13,2	12	11,7	11,2	11,5	10,8	11	10,9	10,6	10,7	10,3	10,5	10,3	10,4	10
3P	11,9	11,9	11,6	11	10,9	10,5	10,4	10,6	10,2	10,2	10	10	10,1	10	9,8
4C	12	11,8	11,7	10,9	11,1	10,7	10,7	10,3	10,4	10,1	10,3	10	10,6	9,9	9,8
4M	12,1	11,8	11,8	11,2	10,9	10,7	10,3	10,3	10,4	10,2	10,4	10	10,3	9,8	10
4P	12,1	11,9	11,8	11	10,8	10,7	10,3	10,2	10,3	10,2	10,3	9,9	10,2	9,8	9,9
Concentração Média	12,5	11,9	11,8	11,2	11,1	10,8	10,7	10,6	10,6	10,5	10,4	10,3	10,4	10,2	10,1
<i>OXIGÊNIO</i>															
Posição de amostragem	Horário de leitura (horas)														
	18:00	0:00	6:00	12:00	18:00	6:00	18:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00
1C	2,3	3,5	3,5	3,3	4,3	3,9	3,7	3,7	4	4,3	4,1	4	4,7	4	4,9
1M	0,4	2,8	3	3	2,9	3,6	3,3	3,3	3,5	3,3	3,7	3,3	3,8	3,4	4
2C	1,8	3,2	3,3	3,2	3,5	3,9	3,7	3,4	3,9	3,8	4,1	3,7	4,4	3,8	4,6
2M	1	3	3,1	3,3	3,3	4	3,7	3,8	4,1	3,8	4,2	3,9	4,4	3,9	4,6
2P	3,5	3,2	3,4	3,4	3,7	4,3	4,2	4,3	4,4	4,4	4,5	4,6	4,6	4,6	4,9
3C	0,4	2,9	3,2	3,2	3	3,7	3,5	3,6	3,8	3,6	4	3,6	4,1	3,7	4,4
3M	0,5	2,9	3,2	3,2	3,1	3,9	3,6	3,7	4,1	3,7	4,2	3,8	4,4	3,9	4,6
3P	3	3,1	3,4	3,3	3,6	4,2	4,1	4,2	4,4	4,3	4,4	4,4	4,7	4,3	4,8
4C	3,1	3,1	3,4	3,4	3,6	4,3	4,1	4,3	4,4	4,4	4,4	4,5	4,6	4,5	4,8
4M	3,1	3,1	3,3	3,4	3,7	4,2	4,3	4,3	4,3	4,3	4,4	4,5	4,6	4,5	4,8
4P	3	3,1	3,3	3,3	3,7	4,2	4,3	4,4	4,3	4,3	4,4	4,5	4,6	4,4	4,8
Concentração Média	2,0	3,1	3,3	3,3	3,5	4,0	3,9	3,9	4,1	4,0	4,2	4,1	4,4	4,1	4,7

Quadro 11 - Concentrações de dióxido de carbono e oxigênio no interior do silo (teste experimental 3)

<i>DIÓXIDO DE CARBONO</i>																	
Posição de amostragem	Horário de leitura (horas)																
	12:00	18:00	0:00	6:00	12:00	0:00	12:00	0:00	12:00	0:00	12:00	0:00	12:00	0:00	12:00	0:00	12:00
1C	13	11,7	11,5	11,3	10,8	11	10,9	10,8	10,6	10,5	10,4	10,5	10	10,8	9,5	10,3	10,7
1M	14,4	12,3	12,2	12	11,5	11,8	11,5	11,7	11,1	11	10,9	11,1	10,8	11,7	11,4	11,9	11,6
2C	13,2	11,9	11,8	11,4	11,3	11,3	10,9	11	10,5	10,7	10,5	10,6	9,9	11	10	10,9	10,1
2M	13,9	11,6	11,6	11,6	11,2	11	10,7	10,8	10,3	10,6	10,4	10,5	10,2	10,8	10,1	10,7	10,3
2P	11,4	11,5	11,6	11,6	11,1	10,7	10,5	10,3	10,1	10,2	10,3	9,8	9,5	10	9,4	9,8	9,7
3C	14	12,1	11,9	11,7	11,4	11,5	10,9	11,2	10,6	10,8	10,5	10,7	10,7	10,9	10,3	10,9	10,5
3M	14,2	12,2	11,9	11,8	11,2	11,1	10,6	10,2	10,2	10,7	10,3	10,5	10,3	10,9	10	11	10,2
3P	12	11,5	11,6	11,6	11,1	11	10,4	10,5	10,1	10,2	10	10	9,4	9,6	9,1	9,3	9,6
4C	11,5	11,5	11,7	11,6	11,1	10,9	10,6	10,5	10,2	10,1	10,1	10	9,7	9,6	9,6	9,3	9,7
4M	11,6	11,5	11,8	11,6	11	10,9	10,6	10,4	10,2	10,2	10,1	10	9,7	9,6	9,6	9,5	9,9
4P	11,3	11,4	11,7	11,6	10,9	11	10,5	10,4	10,1	10,2	10	9,9	9,7	9,5	9,6	9,4	9,8
Concentração Média	12,8	11,7	11,8	11,6	11,1	11,1	10,7	10,7	10,4	10,5	10,3	10,3	10,0	10,4	9,9	10,3	10,2
<i>OXIGÊNIO</i>																	
Posição de amostragem	Horário de leitura (horas)																
	12:00	18:00	0:00	6:00	12:00	0:00	12:00	0:00	12:00	0:00	12:00	0:00	12:00	0:00	12:00	0:00	12:00
1C	5	3,4	4,5	4,6	4,9	4,7	4,3	5,1	5	5	5,5	4,8	5,8	4,4	6,1	5,7	4,8
1M	2,6	2,9	3,5	3,8	3,7	3,9	3,9	3,8	4,1	3,8	4,2	3,7	4,3	3,7	4,2	3,7	4,2
2C	3,5	3,3	4	4,3	4,2	4,5	4,3	4,6	4,7	4,4	4,7	4,3	5	4,2	5,4	4,7	5,9
2M	2,3	3,2	3,9	4,2	4,1	4,4	4,5	4,5	4,7	4,4	4,8	4,6	4,9	4,5	5	4,8	5,3
2P	3,5	3,8	4,3	4,4	4,4	4,9	4,7	5,3	5,1	5,2	5,4	5,3	5,1	5,4	5,8	6,3	5,9
3C	2,5	3,2	3,8	4,1	4	4,2	4,2	4,3	4,5	4,2	4,4	4,1	4,6	4,2	4,9	4,3	5,1
3M	2,2	3,1	3,9	4,2	4,2	4,4	4,5	4,4	4,8	4,4	4,7	4,3	5	4,4	5,4	4,6	5,3
3P	3	3,7	4,1	4,4	4,3	4,8	4,7	5,1	5	5,3	5,2	5,4	5,4	5,5	5,8	6,3	6
4C	3,6	3,8	4,2	4,4	4,3	4,8	4,7	5,1	5	5,3	5,3	5,5	5,4	5,8	5,6	6,3	5,9
4M	3,6	3,8	4,1	4,4	4,3	4,8	4,7	5,1	5	5,3	5,4	5,6	5,5	5,8	5,6	6,3	5,8
4P	3,7	3,8	4,2	4,4	4,4	4,8	4,7	5,1	5	5,3	5,5	5,5	5,5	5,8	5,6	6,3	5,8
Concentração Média	3,2	3,5	4,0	4,3	4,3	4,6	4,5	4,8	4,8	4,8	5,0	4,8	5,1	4,9	5,4	5,4	5,5

Quadro 12 - Concentrações de dióxido de carbono e oxigênio no interior do silo (teste experimental 4)

<i>DÍÓXIDO DE CARBONO</i>																
Posição de amostragem	Horário de leitura (horas)															
	18:00	0:00	6:00	12:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00
1C	12,3	12,7	12,2	12,4	12,1	11,7	11,6	11,4	11,2	11,1	11,2	10,6	10,9	10,2	10,3	10,2
1M	14,1	14	12,8	12,8	12,7	12,6	12,2	12,1	11,9	11,8	11,8	11,4	11,4	11,1	11,3	10,9
2C	13	12,8	12,3	12	12	11,8	11,5	11,2	11,3	11,1	11	10,8	10,7	10,6	10,7	10,3
2M	14,2	13	12,4	12,1	12,1	11,8	11,5	11,2	11,2	10,9	10,9	10,7	10,6	10,5	10,3	10,2
2P	13,5	12,4	12,4	11,8	11,7	11,3	11,2	11	11	10,6	10,5	10,5	10,4	10,3	10	10,1
3C	14,1	13,2	12,4	12,2	12,2	11,9	11,6	11,4	11,1	11	11,1	10,9	10,9	10,6	10,4	10,3
3M	14,5	13,4	12,4	12,2	12,2	11,8	11,6	11,1	11,2	10,9	10,9	10,7	10,6	10,5	10,3	10,1
3P	13,2	12,1	12	11,7	11,6	11,2	10,8	10,6	10,6	10,5	10,2	10,4	10,1	10	9,8	9,8
4C	12,5	12,4	12,2	12	11,7	11,3	10,9	10,8	10,5	10,4	10,5	10,3	10,3	10,2	9,9	9,7
4M	12,4	12,6	12,5	12,2	11,8	11,5	11,1	11	10,8	10,7	10,7	10,6	10,5	10,4	10,3	10,1
4P	12,5	12,5	12,6	12,1	11,8	11,7	11	11,2	10,7	10,5	10,6	10,5	10,5	10,3	10,2	10,2
Concentração média	13,3	12,8	12,4	12,1	12,0	11,7	11,4	11,2	11,0	10,9	10,9	10,7	10,6	10,4	10,3	10,2
<i>OXIGÊNIO</i>																
Posição de amostragem	Horário de leitura (horas)															
	18:00	0:00	6:00	12:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00	18:00	6:00
1C	3,6	3,1	3,3	3,4	3,4	3,6	3,5	3,7	3,5	3,9	3,7	3,8	3,7	5,1	4,9	4,8
1M	2,7	2,5	2,9	2,9	2,9	3,1	3,1	3,2	3,2	3,4	3,4	3,4	3,3	4,1	4,1	4,3
2C	2,9	3	3,3	3,4	3,3	3,6	3,5	3,8	3,5	3,9	3,8	3,8	3,8	4,6	4,5	4,7
2M	2,7	3	3,4	3,4	3,4	3,7	3,6	4	3,7	4,1	4	4	3,9	4,5	4,6	4,9
2P	3	3,5	3,6	3,7	3,9	4,1	4,2	4,5	4,2	4,5	4,5	4,4	4,5	4,9	5,2	5,1
3C	2,8	2,9	3,2	3,2	3,2	3,6	3,4	3,7	3,6	3,9	3,8	3,8	3,7	4,3	4,5	4,6
3M	2,7	2,9	3,4	3,4	3,4	3,8	3,6	4	3,8	4,2	4,1	4,1	4	4,7	4,7	4,9
3P	2,9	3,5	3,7	3,7	3,9	4,2	4,3	4,5	4,2	4,6	4,6	4,5	4,9	4,9	5,1	5,2
4C	3,3	3,5	3,6	3,6	3,9	4,1	4,3	4,4	4,3	4,6	4,5	4,4	4,4	4,9	5	5,2
4M	3,3	3,4	3,5	3,6	3,9	4,1	4,2	4,3	4,3	4,5	4,5	4,4	4,3	4,8	5	5,1
4P	3,2	3,5	3,4	3,6	3,9	4,1	4,3	4,3	4,3	4,6	4,5	4,4	4,4	4,8	5	5,1
Concentração média	3,0	3,2	3,4	3,4	3,6	3,8	3,8	4,0	3,9	4,2	4,1	4,1	4,1	4,7	4,8	4,9

Quadro 13 - Concentrações de dióxido de carbono e oxigênio no interior do silo (teste experimental 5)  
data de início: 05/09/2000

<i>Dióxido de Carbono</i>								
Posição de amostragem	Horário de leitura (horas)							
	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	12:00
1C	13,2	12,2	11,6	11,2				10
1M	14	12,8	12,1	11,8				11
2C	13,3	12,3	11,3	11,3				10
2M	14,2	12,4	11,8	11,5				10
2P	13,3	12,1	11,6	11				10
3C	13,4	12,3	11,8	11,4				11
3M	14	12,5	11,9	11,5				10
3P	13,3	11,8	11,3	10,6				10
4C	13,4	12,2	11,4	10,8				10
4M	13,4	12,5	11,7	11,1				10
4P	13,3	12,5	11,6	11				10
<i>Oxigênio</i>								
Posição de amostragem	Horário de leitura (horas)							
	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	18:00	12:00
1C	2,5	3,4	3,7	3,9				6,2
1M	1,9	3,2	3,4	3,6				5,8
2C	2,7	3,4	3,7	3,8				5,9
2M	2,3	3,5	3,7	3,8				5,6
2P	3	3,8	4	4,5				6,2
3C	2,3	3,3	3,5	3,7				5,7
3M	2	3,5	3,7	3,9				5,9
3P	2,8	3,7	4	4,6				6,2
4C	2,9	3,7	4	4,4				5,9
4M	3	3,6	4	4,4				5,9
4P	2,9	3,6	4	4,4				5,9

Quadro 14 - Concentrações de dióxido de carbono e oxigênio no interior do silo (teste experimental 6)

<i>Dióxido de Carbono</i>									
Posição de amostragem	Horário de leitura (horas)								
	18:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00
1C	12,2	9,6	9,8	9	9,2	9,6	9,8	10	
1M	12,8	10,4	10	9,6	9,8	9,8	9,8	9,8	
2C	13	10	9,8	9,4	9	8,8	8,6	9,2	
2M	12,8	10	9,6	9	8,8	8,6	8,6	8,6	
2P	12,4	10,6	9,2	8,8	8,4	8,2	8	7,6	
3C	12,2	10,8	10	9,8	9,2	9	9	8,8	
3M	12	10,2	9,6	9,2	8,8	8,6	8,6	8,4	
3P	11,6	10,4	9,4	8,8	8,6	8,4	8	7,2	
4C	11	10,2	9,2	8,8	9	8,6	8	7,2	
4M	10,8	10,4	9,4	8,6	8,8	8,2	7,8	7,2	
4P	11,2	10,2	9,2	8,8	9	8,4	8	7,2	
<i>Oxigênio</i>									
Posição de amostragem	Horário de leitura (horas)								
	18:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00
1C	3,2	3,8	4,4	5,8	5,4	5,4	5,5	5,1	
1M	2,5	3,4	4,3	4,9	5,4	5,6	5,8	5,8	
2C	2,8	3,5	4,4	5	5,5	5,8	6,1	6,3	
2M	2,4	3,8	4,6	4,8	5,9	6,2	6,5	6,7	
2P	2,5	4,6	4,8	5,9	6,4	6,8	7,5	8	
3C	2,5	3,3	4,4	4,9	5,5	6	6,2	6,5	
3M	2,6	3,5	4,6	5,3	6,1	6,5	6,8	7,1	
3P	2,4	3,9	5,1	5,9	6,4	7	7,5	7,9	
4C	2,8	3,6	4,8	5,6	6,3	6,9	7,4	7,9	
4M	2,8	3,6	4,8	5,5	6,3	6,8	7,5	7,9	
4P	2,8	3,6	4,9	5,5	6,3	6,9	7,5	7,8	

Quadro 15 - Concentrações de dióxido de carbono e oxigênio no interior do silo (teste experimental 7)

data de início : 19/09/2000

<i>Dióxido de Carbono</i>									
Posição de amostragem	Horário de leitura (horas)								
	12:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00
1C	12	11,2	10,6	10	10	9,8	9,4	9,2	
1M	11,8	11,4	10,6	10,2	10,2	10,4	10,2	10	
2C	11,8	10,4	10,4	10	9,8	9,6	9,4	9,2	
2M	11,8	10,6	10	9,2	9	9	8,8	8,8	
2P	11,6	10,2	9,8	8,8	8,4	8	7,6	7,2	
3C	11,4	10,8	10,2	9,6	9,6	9,6	9,2	8,8	
3M	11,6	10,6	10	9,2	9	8,8	8,2	7,8	
3P	11,6	10,4	9,6	9	8,8	8,6	7,5	7	
4C	11,6	10,4	9,2	8,8	8,4	8,2	7,8	6,8	
4M	11,6	10,4	9,4	9	8,2	8	7,6	7	
4P	11,4	10,4	9,4	9	8,2	8	7,4	7	
<i>Oxigênio</i>									
Posição de amostragem	Horário de leitura (horas)								
	12:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00
1C	4,6	4,4	4,7	5,6	4,5	6,1	5,1	8,1	
1M	3,9	4	4,4	5	5,1	5,2	5,7	6,5	
2C	3,9	4,2	4,9	5,6	5,6	6,1	6,6	7,9	
2M	4	4,5	5,1	5,8	6	6,3	6,9	7,7	
2P	3,2	5,1	5,6	6,7	7,1	7,8	8,1	9,7	
3C	3,6	4,2	4,9	5,6	5,9	6,3	6,8	7,8	
3M	3,8	4,5	5,4	6,3	6,5	7,1	7,6	8,9	
3P	3,2	4,8	5,7	6,6	7,1	7,5	8,1	9,9	
4C	3,2	4,8	5,6	6,5	7,1	7,6	8,1	9,5	
4M	3,2	4,8	5,7	6,5	7,1	7,6	8,1	9,5	
4P	3,2	4,8	5,7	6,6	7	7,7	8	9,6	

Quadro 16 - Concentrações de dióxido de carbono e oxigênio no interior do silo (teste experimental 8)  
data de início: 26/09/2000

<i>Dióxido de Carbono</i>								
Posição de amostragem	Horário de leitura (horas)							
	14:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00
1C	11	10	9,8	9	9	8,8	8,8	8,8
1M	11,6	10,6	9,8	9,2	8,8	8,8	8,6	8,6
2C	11	10,4	9,6	9,2	9	9,2	9,2	9,2
2M	11,6	10,2	9,4	8,8	8,6	8,4	8,4	8,4
2P	11	10,4	9,2	8,6	8	7,8	7,6	7,6
3C	11,2	10,4	9,8	9,2	8,8	8,4	8	8
3M	11,4	10,2	9,4	8,8	8,6	8,2	8	8
3P	10,8	10	9,4	8,4	8,2	8	7,8	7,8
4C	10,8	9,6	9,2	8,6	8,4	8,2	7,8	7,8
4M	11	10	9	8,6	8,4	8,2	7,6	7,6
4P	10,8	9,8	9	8,4	8,4	8	7,6	7,6
<i>Oxigênio</i>								
Posição de amostragem	Horário de leitura (horas)							
	14:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00	8:00
1C	3,6	4,1	5,2	5,7	6	6,3	6,9	6,9
1M	3,2	3,8	5	5,6	6,3	6,6	7,1	7,1
2C	3,8	4	5,1	5,8	6,5	6,8	7,3	7,3
2M	2,4	4	5,2	6,1	6,7	6,9	7,4	7,4
2P	3,2	4,1	5,6	6,2	7	7,4	8,1	8,1
3C	3,7	3,9	5	5,8	6	6,5	7,2	7,2
3M	2,4	4,1	5,2	6,1	6,4	7	7,7	7,7
3P	3,1	4,1	5,5	6,2	7	7,2	8,5	8,5
4C	3,2	4,1	5,3	6,2	6,6	6,8	7,8	7,8
4M	3,1	4	5,3	6,2	6,6	7	8	8
4P	3,1	4,1	5,4	6	6,8	7	7,9	7,9

Quadro 17 - Temperaturas dos gases nos componentes do equipamento (teste experimental 1) realizado em 08/08/2000

Tempo (horas)	Temperatura dos gases (°C)							
	Antes	Antes Radiador	Exaustão Radiador	Após Radiador	Álcool	Após Refrigerador	Bulbo Seco	Bulbo Molhado
	Fornalha							
15:48	33,5	87,9	26,0	27,1	14,2	21,1	28,6	24,4
15:50	33,1	109,0	26,8	28,0	14,3	21,1	28,5	24,8
15:52	33,2	115,9	26,7	28,5	14,4	21,1	28,5	25,2
15:54	33,2	104,6	26,2	28,1	14,4	21,0	28,3	25,2
15:56	29,3	97,0	26,6	28,0	14,6	20,9	28,2	25,0
15:58	29,0	88,5	26,0	27,5	14,7	20,8	28,0	25,0
16:00	29,1	83,6	27,2	27,6	14,8	20,7	27,8	25,0
16:02	29,0	79,4	26,0	27,2	14,8	20,6	27,8	25,0
16:04	28,9	77,7	26,5	27,0	14,9	20,5	27,6	24,8
16:06	28,8	77,0	25,4	26,7	15,0	20,5	27,7	24,8
16:08	28,3	77,3	25,5	26,3	15,1	20,4	27,5	24,5
16:10	27,9	77,6	25,0	26,0	15,1	20,4	27,5	24,4
16:12	27,9	79,0	25,2	26,0	15,2	20,5	27,5	24,4
16:14	27,7	80,5	24,8	25,7	15,2	20,5	27,4	24,3
16:16	27,7	81,8	25,3	25,8	15,3	20,6	27,4	24,2
16:18	27,6	82,8	25,3	25,7	15,3	20,7	27,4	24,3
16:20	27,5	84,2	25,2	25,7	15,4	20,7	27,4	24,3
16:22	27,4	84,9	24,8	25,6	15,4	20,8	27,4	24,3
16:24	26,9	85,3	24,2	25,0	15,5	20,9	27,3	24,1
16:26	26,9	86,5	24,3	25,0	15,6	21,0	27,3	24,1
16:28	26,7	87,3	24,4	25,0	15,8	21,1	27,2	24,1
16:30	26,5	88,1	24,3	24,9	15,9	21,2	27,2	24,1
16:32	26,4	89,4	24,2	24,9	16,0	21,3	27,3	24,2
16:34	26,3	91,4	24,4	25,0	16,2	21,5	27,4	24,3
16:36	26,2	92,3	24,3	24,8	16,3	21,6	27,3	24,3
16:38	26,1	93,4	24,2	24,8	16,4	21,7	27,4	24,4
16:40	25,9	94,6	23,8	24,6	16,6	21,8	27,4	24,4
16:42	25,9	96,3	23,8	24,6	16,7	21,8	27,3	24,4
16:44	25,6	96,3	23,7	24,4	16,8	21,9	27,3	24,3
16:46	25,4	98,1	23,5	24,3	17,0	22,0	27,2	24,3
16:48	25,4	99,4	23,6	24,2	17,0	22,1	27,3	24,4
16:50	25,2	100,3	23,7	24,2	17,2	22,1	27,2	24,4
16:52	25,1	100,8	23,9	24,4	17,3	22,3	27,3	24,4
16:54	25,0	101,6	23,1	24,1	17,4	22,3	27,2	24,4
16:56	24,5	101,6	22,9	23,7	17,5	22,2	26,9	24,3
16:58	24,0	101,9	22,6	23,5	17,6	22,2	26,7	24,1
17:00	23,6	101,1	22,6	23,3	17,7	22,2	26,6	24,0
17:02	23,3	101,4	22,5	23,2	17,8	22,2	26,5	23,9
17:04	23,0	102,8	22,4	23,1	17,9	22,2	26,3	23,9
17:06	22,8	103,5	22,1	22,8	18,0	22,1	26,2	23,8
17:08	22,6	104,4	22,1	22,7	18,0	22,1	26,1	23,8
17:10	22,4	104,9	21,9	22,6	18,1	22,1	26,1	23,7
17:12	22,3	105,0	22,0	22,5	18,1	22,2	26,1	23,7
17:14	22,1	105,4	21,9	22,5	18,2	22,3	26,1	23,8
17:16	22,0	106,1	21,8	22,4	18,3	22,3	26,1	23,8
17:18	21,9	105,7	21,7	22,3	18,3	22,3	26,0	23,8
17:20	21,7	106,2	21,5	22,2	18,3	22,3	26,1	23,8
17:22	21,5	105,6	21,3	22,0	18,4	22,3	26,0	23,7
17:24	21,5	106,1	21,6	22,0	18,4	22,4	26,0	23,7
17:26	21,4	104,7	21,5	22,0	18,5	22,5	26,0	23,7
17:28	21,2	102,7	21,5	21,9	18,5	22,5	25,9	23,7
17:30	21,1	102,5	20,8	21,6	18,6	22,4	25,9	23,7
17:32	20,9	101,3	20,9	21,5	18,6	22,4	25,8	23,6
17:34	20,8	99,9	20,7	21,3	18,6	22,4	25,8	23,6
17:36	20,7	98,0	20,5	21,2	18,7	22,4	25,7	23,6
17:38	20,5	96,5	20,6	21,1	18,7	22,4	25,7	23,5

Quadro 18 - Temperaturas dos gases nos componentes do equipamento (teste experimental 2) realizado em 15/08/2000

Tempo (horas)	Temperatura dos gases (oC)							
	Antes Fornalha	Antes Radiador	Exaustão Radiador	Após Radiador	Álcool	Após Refrigerador	Bulbo Seco	Bulbo Molhado
15:43	31,6	43,7	25,0	25,4	-3,4	11,6	21,7	19,2
15:45	31,5	44,4	25,2	25,5	-3,0	11,8	21,3	19,2
15:47	31,8	45,5	25,3	25,7	-2,5	12,1	21,0	19,3
15:49	27,3	47,3	25,3	25,7	-2,0	12,2	20,8	19,5
15:51	27,4	49,9	25,2	25,6	-1,5	12,3	20,6	19,3
15:53	27,3	51,7	25,2	25,6	-0,9	12,3	20,7	18,9
15:55	27,0	52,3	25,2	25,4	-0,3	12,4	21,2	18,9
15:57	26,9	52,7	25,0	25,2	0,1	12,5	21,6	19,0
15:59	27,0	53,2	24,9	25,2	0,7	12,7	21,9	19,1
16:01	26,9	52,8	24,9	25,2	1,2	13,0	22,3	19,3
16:03	26,9	52,7	24,8	25,1	1,6	13,2	22,5	19,4
16:05	27,1	52,2	24,7	25,1	2,0	13,4	22,8	19,5
16:07	27,0	51,5	24,6	24,8	1,9	13,6	23,5	19,8
16:09	28,9	56,1	24,9	25,0	2,4	13,8	23,3	20,4
16:11	28,6	54,7	25,2	25,1	2,6	13,5	23,1	20,5
16:13	29,1	65,0	25,1	25,3	2,8	13,9	22,7	20,5
16:15	29,2	68,1	24,7	25,2	3,1	14,1	22,8	20,5
16:17	26,9	67,6	24,7	25,2	3,4	14,0	22,8	20,3
16:19	26,6	68,7	24,9	25,2	3,6	14,0	22,9	20,0
16:21	26,8	68,9	25,0	25,3	3,8	14,2	23,3	20,0
16:23	26,7	67,9	24,1	24,9	4,1	14,3	23,4	20,1
16:25	26,6	66,8	24,6	25,0	4,3	14,5	23,6	20,2
16:27	26,9	66,3	24,9	25,1	4,6	14,8	23,9	20,3
16:29	26,5	63,8	24,8	25,0	4,8	15,0	23,9	20,3
16:31	26,1	61,9	24,3	24,8	5,0	15,1	24,0	20,4
16:33	26,0	60,3	24,5	24,9	5,3	15,4	24,1	20,5
16:35	27,7	66,4	24,3	24,9	5,5	15,5	24,2	21,0
16:37	27,5	75,1	23,4	24,4	5,7	15,3	23,9	21,1
16:39	27,5	50,6	24,2	24,5	5,9	15,7	24,1	21,1
16:41	27,3	66,0	24,1	24,4	5,9	14,8	24,1	21,1
16:43	27,0	73,4	24,2	24,5	6,1	15,2	23,6	20,9
16:45	25,4	74,9	24,2	24,7	6,2	15,3	23,8	20,8
16:47	25,0	76,1	22,9	24,2	6,4	15,5	24,0	20,5
16:49	24,7	76,1	23,0	23,7	6,6	15,7	23,9	20,3
16:51	24,6	74,8	23,8	24,0	6,7	15,9	24,0	20,3
16:53	24,0	72,4	22,3	23,3	6,9	16,1	23,9	20,3
16:55	24,1	71,5	23,6	23,7	7,0	16,2	24,0	20,2
16:57	23,8	68,8	22,6	23,1	7,2	16,3	24,0	20,2
16:59	23,8	63,1	22,9	23,1	7,3	16,5	24,0	20,1
17:01	23,7	78,3	21,4	22,6	7,4	15,8	23,4	20,3
17:03	23,2	83,7	21,0	21,9	7,5	15,4	22,8	20,0
17:05	22,8	80,3	22,1	22,1	7,6	15,4	22,7	19,7
17:07	22,6	84,2	21,4	22,1	7,7	15,3	22,6	19,6
17:09	22,2	86,6	20,5	21,5	7,8	15,1	22,3	19,4
17:11	21,9	89,8	21,5	21,5	7,9	15,1	22,1	19,2
17:13	21,9	92,1	20,2	21,0	7,9	14,9	21,9	19,1
17:15	21,6	94,6	20,7	20,7	8,0	14,8	21,6	18,8
17:17	21,7	95,4	20,3	21,1	8,0	14,9	21,8	18,9
17:19	21,5	97,9	20,0	20,6	8,1	14,8	21,7	18,8
17:21	21,4	100,1	19,9	20,3	8,1	14,7	21,5	18,7
17:23	21,2	100,7	19,8	20,2	8,2	14,7	21,4	18,6
17:25	21,2	102,7	20,0	20,0	8,2	14,7	21,3	18,5
17:27	21,3	105,4	20,9	20,3	8,2	14,7	21,4	18,5
17:29	21,3	106,8	20,1	20,1	8,3	14,8	21,4	18,5

Quadro 19 – Temperaturas dos gases nos componentes do equipamento (teste experimental 3) realizado em 22/08/2000

Tempo (horas)	Temperatura dos gases (oC)								
	Antes Fornalha	Antes Radiador	Exaustão Radiador	Após Radiador	Bulbo Molhado 1	Álcool	Após Refrigerador	Bulbo Seco	Bulbo Molhado 2
9:16	22,8	42,2	22,0	21,0	21,0	-2,3	9,6	17,7	15,9
9:18	23,0	44,4	20,8	21,4	21,3	-2,0	9,9	18,0	16,0
9:20	24,1	49,5	24,6	22,5	22,4	-1,7	10,3	18,6	16,4
9:22	24,8	53,0	24,3	22,8	22,8	-1,4	10,7	19,1	16,8
9:24	26,0	56,5	24,8	23,6	23,5	-1,1	11,1	19,8	17,3
9:26	26,8	59,6	24,7	23,9	23,9	-0,9	11,4	20,2	17,7
9:28	26,6	61,6	23,6	23,4	23,4	-0,6	11,4	20,3	17,8
9:30	25,8	63,5	21,4	22,8	22,7	-0,4	11,3	20,3	17,6
9:32	24,7	64,9	21,1	21,9	21,8	-0,1	11,2	19,9	17,3
9:34	24,0	66,7	21,1	21,6	21,6	0,1	11,4	19,8	17,2
9:36	24,4	69,0	23,4	22,1	22,1	0,4	11,5	20,2	17,4
9:38	25,9	70,8	25,3	23,6	23,6	0,6	12,0	21,0	18,1
9:40	27,0	71,8	25,2	24,3	24,3	0,8	12,4	21,4	18,6
9:42	27,9	73,0	24,3	24,3	24,3	1,1	12,6	21,7	18,9
9:44	28,6	74,0	24,1	24,2	24,2	1,3	12,7	21,9	19,0
9:46	27,5	75,3	22,2	23,3	23,1	1,5	12,7	21,6	18,7
9:48	26,3	76,4	21,8	22,5	22,5	1,7	12,6	21,3	18,4
9:50	25,0	77,3	21,5	22,1	22,1	2,0	12,6	21,0	18,1
9:52	25,1	78,9	22,2	22,8	22,7	2,2	12,8	21,3	18,3
9:54	25,2	81,2	21,6	22,5	22,4	2,4	12,8	21,4	18,4
9:56	24,7	82,3	21,5	22,1	22,1	2,5	12,8	21,3	18,3
9:58	24,6	82,7	22,3	22,4	22,4	2,7	13,1	21,2	18,2
10:00	25,7	83,7	23,3	23,7	23,6	2,9	13,4	21,7	18,6
10:02	27,2	84,8	23,8	24,5	24,4	3,1	13,8	22,3	19,0
10:04	27,3	87,1	22,9	24,1	24,0	3,2	13,9	22,6	19,2
10:06	27,6	88,7	23,3	24,1	24,1	3,4	14,2	22,6	19,3
10:08	28,2	89,9	22,8	24,4	24,3	3,6	14,4	23,0	19,5
10:10	28,5	90,8	22,4	24,3	24,2	3,8	14,6	23,1	19,5
10:12	28,8	92,1	22,7	24,1	24,0	4,0	14,7	23,2	19,6
10:14	29,4	92,6	23,2	24,3	24,3	4,1	14,9	23,4	19,7
10:16	30,1	93,9	23,6	24,8	24,7	4,3	15,2	23,6	19,9
10:18	30,7	95,7	24,1	25,1	25,0	4,5	15,5	23,8	20,0
10:20	31,0	95,5	24,2	25,4	25,3	4,7	15,8	24,1	20,3
10:22	31,0	95,9	24,9	25,7	25,7	4,9	16,1	24,3	20,4
10:24	31,0	96,5	24,4	25,9	25,8	5,0	16,4	24,5	20,6
10:26	30,3	98,0	23,2	25,3	25,2	5,2	16,3	24,5	20,6
10:28	29,9	98,2	23,8	25,2	25,2	5,4	16,6	24,5	20,5
10:30	29,4	95,9	24,3	25,2	25,1	5,6	16,9	24,6	20,5
10:32	29,3	96,0	24,9	25,4	25,3	5,7	17,2	24,9	20,6

Quadro 20 - Temperaturas dos gases nos componentes do equipamento (teste experimental 4) realizado em 29/08/2000

Tempo (horas)	Temperatura dos gases (oC)								
	Antes Fornalha	Antes Radiador	Exaustão Radiador	Após Radiador	Bulbo Molhado 1	Álcool	Após Refrigerador	Bulbo Seco	Bulbo Molhado 2
14:35	17,3	29,9	17,0	17,3	16,3	-3,3	8,5	16,6	13,3
14:37	17,4	31,9	17,5	17,4	16,9	-3,1	8,4	16,5	13,6
14:39	17,5	34,5	17,5	17,4	17,0	-2,8	8,3	16,5	14,0
14:41	17,6	37,6	17,3	17,5	17,2	-2,6	8,5	16,3	14,3
14:43	17,7	39,2	17,7	17,6	17,4	-2,4	8,7	16,2	14,7
14:45	17,9	39,3	17,8	17,9	17,6	-2,2	8,7	16,0	14,6
14:47	18,1	39,4	17,7	17,9	17,7	-2,0	8,8	16,0	14,5
14:49	18,2	39,8	17,7	18,0	17,7	-1,8	8,8	15,9	14,6
14:51	18,3	40,1	17,9	18,0	17,8	-1,6	8,9	16,0	14,6
14:53	18,4	41,6	17,9	18,0	17,9	-1,5	9,0	16,1	14,6
14:55	18,5	43,7	17,8	18,0	17,9	-1,3	9,1	16,1	14,7
14:57	18,6	46,9	17,9	17,6	17,5	-1,1	9,2	16,2	14,8
14:59	18,7	49,5	18,0	17,5	17,5	-0,9	9,4	16,3	14,8
15:01	18,6	51,6	17,9	17,6	17,5	-0,7	9,5	16,4	14,8
15:03	18,6	53,3	17,9	17,6	17,6	-0,6	9,6	16,5	14,8
15:05	18,6	55,2	18,1	17,7	17,7	-0,4	9,6	16,6	14,9
15:07	18,7	56,9	18,3	17,7	17,7	-0,3	9,6	16,8	15,0
15:09	18,9	58,4	18,4	17,9	17,9	-0,2	9,9	17,0	15,1
15:11	19,0	59,7	18,3	17,9	17,9	0,0	10,0	17,1	15,2
15:13	19,1	60,4	18,3	18,0	17,9	0,2	10,1	17,2	15,3
15:15	19,1	61,5	18,4	18,0	17,9	0,3	10,1	17,4	15,4
15:17	19,2	62,5	18,3	18,0	17,9	0,5	10,3	17,5	15,4
15:19	19,2	62,8	18,3	17,9	17,9	0,6	10,3	17,5	15,5
15:21	19,3	63,1	18,3	17,6	17,5	0,7	10,3	17,6	15,5
15:23	19,4	63,9	18,2	17,1	17,1	0,9	10,4	17,7	15,5
15:25	19,4	63,2	18,3	17,4	17,3	1,0	10,5	17,8	15,6
15:27	19,4	63,2	18,1	17,8	17,7	1,1	10,7	17,9	15,6
15:29	19,4	63,6	18,1	18,1	18,1	1,2	10,6	17,9	15,7
15:31	18,6	63,5	18,2	18,2	18,1	1,3	10,6	17,9	15,7
15:33	18,3	61,9	18,0	18,2	18,1	1,4	10,7	18,2	15,2
15:35	18,3	60,0	18,2	18,2	18,1	1,6	10,9	18,4	15,3
15:37	18,2	57,6	18,3	18,2	18,2	1,7	11,2	18,5	15,3
15:39	18,1	55,0	18,1	18,1	18,1	1,8	11,5	18,7	15,3
15:41	18,2	49,5	18,0	18,0	18,0	1,9	11,7	18,7	15,3
15:43	18,6	58,0	18,2	18,2	18,1	2,0	11,6	18,8	15,8
15:45	18,7	60,8	18,4	18,2	18,2	2,1	11,5	18,7	16,0
15:47	18,8	62,9	18,3	18,2	18,2	2,2	11,5	18,6	16,1
15:49	18,9	65,0	18,4	18,4	18,3	2,3	11,5	18,5	16,1
15:51	19,0	65,8	18,4	18,4	18,4	2,4	11,5	18,6	16,1
15:53	19,0	66,7	18,2	18,4	18,3	2,5	11,5	18,6	16,2
15:55	19,0	69,7	18,2	18,4	18,4	2,6	11,4	18,6	16,3
15:57	19,1	70,2	18,5	18,5	18,5	2,7	11,4	18,6	16,1
15:59	19,2	69,9	18,2	18,5	18,4	2,8	11,6	18,7	16,0
16:01	19,3	69,3	18,1	18,5	18,4	2,9	11,7	18,8	16,0

Continuação do Quadro 20

Tempo (horas)	Temperatura dos gases (oC)								
	Antes Fornalha	Antes Radiador	Exaustão Radiador	Após Radiador	Bulbo Molhado 1	Álcool	Após Refrigerador	Bulbo Seco	Bulbo Molhado 2
16:05	19,4	65,8	18,5	18,6	18,5	3,0	12,0	19,0	16,0
16:07	19,5	65,0	18,2	18,4	18,4	3,1	12,1	19,0	16,1
16:09	19,6	63,8	18,6	18,6	18,6	3,2	12,1	19,2	16,2
16:11	19,6	63,2	18,6	18,5	18,5	3,3	12,1	19,1	16,2
16:13	19,7	63,7	18,5	18,5	18,5	3,4	12,3	19,2	16,2
16:15	19,7	63,4	18,5	18,5	18,5	3,5	12,5	19,3	16,2
16:17	19,7	62,8	18,6	18,5	18,4	3,5	12,6	19,4	16,2
16:19	19,7	62,6	18,6	18,5	18,5	3,6	12,7	19,5	16,3
16:21	19,7	62,1	18,4	18,5	18,4	3,7	12,8	19,6	16,4
16:23	19,7	62,3	18,4	18,5	18,4	3,8	13,0	19,7	16,4
16:25	19,7	62,6	18,5	18,6	18,5	3,8	13,0	19,8	16,5
16:27	19,7	62,4	18,5	18,5	18,5	3,9	13,0	19,8	16,5
16:29	19,7	62,1	18,6	18,5	18,5	3,9	13,2	19,8	16,5
16:31	19,7	61,6	18,5	18,4	18,4	4,0	13,2	19,8	16,6
16:33	19,7	62,3	18,4	18,5	18,5	4,1	13,3	19,9	16,6
16:35	19,7	62,0	18,6	18,5	18,5	4,1	13,3	19,9	16,6
16:37	19,7	63,0	18,5	18,5	18,5	4,2	13,3	19,9	16,7
16:39	19,7	62,8	18,6	18,6	18,5	4,2	13,2	19,9	16,8
16:41	19,7	63,1	18,5	18,6	18,6	4,3	13,2	19,9	16,8
16:43	19,6	63,4	18,8	18,7	18,7	4,3	13,3	19,9	16,8
16:45	19,6	63,7	18,9	18,7	18,7	4,4	13,3	19,9	16,9
16:47	19,6	64,4	18,7	18,7	18,7	4,5	13,2	20,0	17,0
16:49	19,6	65,2	18,7	18,7	18,7	4,5	13,3	19,9	17,0
16:51	19,6	65,4	18,7	18,7	18,7	4,6	13,3	19,9	16,9
16:53	19,5	65,2	18,6	18,6	18,6	4,7	13,4	19,9	16,9
16:55	19,4	65,2	18,6	18,6	18,5	4,7	13,4	19,9	16,9
16:57	19,3	64,9	18,5	18,5	18,4	4,7	13,4	19,9	16,9
16:59	19,0	64,6	18,4	18,5	18,4	4,8	13,5	19,9	16,9
17:01	18,9	65,3	18,5	18,4	18,4	4,8	13,5	19,9	16,9
17:03	19,0	66,5	18,3	18,4	18,3	4,9	13,5	20,0	16,9
17:05	19,0	66,9	18,6	18,5	18,4	4,9	13,6	20,1	17,0
17:07	19,1	67,4	18,2	18,3	18,3	5,0	13,7	20,2	17,0
17:09	19,2	68,0	18,4	18,4	18,3	5,0	13,8	20,3	17,0

Quadro 21 - Temperaturas dos gases nos componentes do equipamento (teste experimental 5) realizado em 05/09/2000

Tempo (horas)	Temperatura dos gases (oC)								
	Antes Fornalha	Antes Radiador	Exaustão Radiador	Após Radiador	Bulbo Molhado 1	Álcool	Após Refrigerador	Bulbo Seco	Bulbo Molhado 2
12:57	23,3	35,3	20,5	20,8	20,1	-2,6	10,3	19,0	15,8
12:59	23,3	36,5	20,7	20,9	20,3	-2,4	10,2	19,0	16,1
13:01	23,4	37,1	20,2	20,7	20,2	-2,1	10,3	19,0	16,2
13:03	23,5	37,7	20,4	20,7	20,4	-1,9	10,4	19,0	16,3
13:05	23,7	37,8	20,9	20,9	20,5	-1,7	10,4	19,1	16,3
13:07	23,9	38,1	20,5	20,8	20,5	-1,5	10,5	19,2	16,3
13:09	24,4	38,5	21,9	21,3	21,0	-1,3	10,8	19,5	16,5
13:11	25,1	38,7	22,3	21,8	21,6	-1,1	11,1	19,7	16,8
13:13	25,4	38,0	20,8	21,4	21,1	-0,9	11,0	19,9	16,8
13:15	25,2	38,1	20,5	21,1	20,9	-0,7	11,1	19,9	16,7
13:17	25,0	38,9	20,9	21,1	21,0	-0,5	11,2	20,0	16,7
13:19	24,8	40,0	21,0	21,2	20,9	-0,2	11,4	20,0	16,7
13:21	24,6	41,4	20,9	21,1	20,9	-0,1	11,5	20,1	16,8
13:23	24,3	42,6	21,1	21,1	20,9	0,1	11,7	20,2	16,8
13:25	23,9	44,0	21,1	21,2	21,1	0,2	11,8	20,4	16,9
13:27	23,5	45,0	20,8	21,1	20,9	0,4	11,9	20,4	16,9
13:29	23,4	46,5	20,7	21,0	20,9	0,6	12,1	20,4	16,9
13:31	23,4	47,4	20,5	20,9	20,7	0,8	12,2	20,6	17,0
13:33	23,9	48,2	20,5	20,8	20,7	0,9	12,4	20,8	17,1
13:35	24,1	48,9	21,1	21,0	20,8	1,1	12,5	20,8	17,1
13:37	23,9	49,1	21,0	21,1	20,9	1,2	12,5	20,9	17,2
13:39	23,8	50,4	21,2	21,2	21,0	1,4	12,6	20,9	17,3
13:41	23,7	50,9	21,0	21,1	21,0	1,5	12,5	20,8	17,3
13:43	23,3	50,5	20,9	21,1	20,9	1,6	12,6	20,8	17,3
13:45	23,1	50,8	21,1	21,2	21,0	1,7	12,7	20,8	17,3
13:47	22,8	50,9	21,0	21,2	21,0	1,8	12,8	20,9	17,4
13:49	22,7	51,3	21,0	21,2	21,1	2,0	12,8	20,9	17,5
13:51	22,7	52,0	21,1	21,3	21,2	2,1	12,9	21,1	17,6
13:53	22,7	52,7	21,2	21,2	21,1	2,2	12,8	21,0	17,5
13:55	22,8	53,8	21,2	21,3	21,1	2,4	12,9	20,9	17,5
13:57	23,0	54,8	21,1	21,3	21,2	2,5	13,0	21,1	17,7
13:59	22,9	55,0	21,0	21,2	21,1	2,6	13,1	21,1	17,6
14:01	23,0	56,5	20,8	21,1	20,9	2,8	13,1	21,2	17,8
14:03	23,0	57,9	21,3	21,4	21,3	2,8	12,9	21,0	17,9
14:05	23,0	58,9	21,4	21,5	21,5	2,9	13,0	21,1	17,8
14:07	23,2	60,7	21,4	21,5	21,5	3,0	13,1	21,1	17,6
14:09	23,4	59,4	20,9	21,5	21,4	3,2	13,4	21,3	17,6
14:11	23,4	58,6	20,9	21,3	21,3	3,3	13,6	21,4	17,6
14:13	23,3	57,1	21,1	21,4	21,2	3,3	13,7	21,5	17,6
14:15	23,3	55,9	21,0	21,2	21,1	3,5	13,8	21,5	17,7
14:17	23,1	54,4	21,1	21,2	21,1	3,6	13,8	21,5	17,7
14:19	23,1	53,1	21,1	21,3	21,1	3,7	13,7	21,4	17,8
14:21	22,9	52,2	21,0	21,1	20,9	3,8	13,8	21,4	17,8
14:23	22,7	51,4	20,9	21,0	20,8	3,8	13,8	21,4	17,8

Continuação do Quadro 21

Tempo (horas)	Temperatura dos gases (°C)								
	Antes Fornalha	Antes Radiador	Exaustão Radiador	Após Radiador	Bulbo Molhado 1	Álcool	Após Refrigerador	Bulbo Seco	Bulbo Molhado 2
14:27	22,4	50,6	20,3	20,7	20,5	4,0	14,0	21,5	17,7
14:29	22,3	50,0	20,6	20,7	20,6	4,1	14,1	21,4	17,6
14:31	22,2	49,7	20,8	20,8	20,7	4,2	14,2	21,5	17,6
14:33	22,2	49,1	20,5	20,7	20,5	4,3	14,3	21,6	17,7
14:35	22,0	48,9	20,2	20,5	20,4	4,3	14,4	21,6	17,7
14:37	21,8	48,9	20,2	20,5	20,4	4,4	14,4	21,6	17,8
14:39	21,7	48,9	20,0	20,3	20,2	4,5	14,4	21,6	17,7
14:41	21,5	48,6	20,0	20,2	20,1	4,5	14,4	21,5	17,7
14:43	21,3	48,6	19,8	20,1	20,0	4,6	14,2	21,4	17,7
14:45	21,1	48,4	19,6	20,0	19,9	4,7	14,2	21,3	17,6
14:47	21,1	48,6	20,1	20,1	20,0	4,7	14,2	21,3	17,6
14:49	21,0	48,3	19,9	20,1	20,0	4,8	14,3	21,3	17,6
14:51	21,0	48,9	19,7	20,0	19,9	4,8	14,2	21,3	17,6
14:53	21,0	49,2	20,2	20,1	20,0	4,9	14,3	21,3	17,6
14:55	21,1	49,1	20,0	20,2	20,0	4,9	14,3	21,3	17,6
14:57	21,1	49,2	20,0	20,2	20,0	5,0	14,3	21,4	17,7
14:59	21,2	49,4	20,2	20,2	20,1	5,0	14,3	21,4	17,7
15:01	21,2	49,2	20,1	20,2	20,1	5,1	14,3	21,4	17,7
15:03	21,4	49,3	20,3	20,3	20,2	5,1	14,4	21,4	17,8
15:05	21,4	49,5	20,2	20,3	20,2	5,2	14,4	21,5	17,8
15:07	21,5	49,0	20,4	20,4	20,3	5,2	14,4	21,6	17,9
15:09	21,5	49,0	20,3	20,4	20,3	5,2	14,4	21,6	18,0
15:11	21,6	48,8	20,5	20,5	20,3	5,3	14,5	21,7	18,0
15:13	21,7	48,9	20,3	20,5	20,3	5,3	14,4	21,7	18,1
15:15	22,1	49,3	20,5	20,5	20,4	5,4	14,5	21,8	18,2
15:17	22,6	49,7	20,8	20,7	20,5	5,4	14,6	21,9	18,3
15:19	23,5	50,5	21,2	21,0	20,9	5,5	14,6	22,1	18,3
15:21	24,4	50,7	21,1	21,1	21,0	5,5	14,7	22,3	18,6
15:23	24,4	50,2	20,9	21,2	21,1	5,5	14,9	22,3	18,6
15:25	24,7	51,0	21,2	21,3	21,1	5,6	14,9	22,4	18,6
15:27	24,9	51,5	21,4	21,4	21,2	5,6	15,1	22,5	18,6
15:29	25,1	51,7	21,4	21,5	21,3	5,7	15,1	22,6	18,7
15:31	26,5	51,8	21,8	21,6	21,4	5,7	15,4	23,1	18,9
15:33	27,6	51,6	21,7	21,8	21,6	5,7	15,5	23,4	19,1

Quadro 22 - Temperaturas dos gases nos componentes do equipamento (teste experimental 6) realizado em 12/09/2000

Tempo (horas)	Temperatura dos gases (°C)								
	Antes Fornalha	Antes Radiador	Exaustão Radiador	Após Radiador	Bulbo Molhado 1	Álcool	Após Refrigerador	Bulbo Seco	Bulbo Molhado 2
16:02	24,0	23,2	22,4	23,3	16,3	12,9	20,6	24,5	21,2
16:04	23,9	23,1	22,4	23,3	16,2	12,8	20,6	24,7	21,1
16:06	24,0	59,9	24,5	25,7	23,9	12,8	18,9	22,8	21,4
16:08	24,7	138,9	33,7	39,4	34,6	13,3	25,2	25,8	25,6
16:10	25,6	186,4	30,8	35,8	32,6	14,3	25,0	26,5	26,5
16:12	26,5	220,1	29,2	30,4	29,4	15,2	23,1	25,5	25,4
16:14	27,1	242,3	28,9	27,1	26,9	15,7	21,6	24,2	24,1
16:16	27,6	237,2	28,3	25,2	25,2	16,0	20,5	23,6	23,5
16:18	27,9	233,4	27,8	23,2	23,1	16,1	19,5	23,2	22,8
16:20	28,6	245,5	29,0	22,4	22,3	16,1	18,9	23,2	22,2
16:22	29,6	282,4	30,9	23,2	23,1	16,1	19,0	23,5	22,2
16:24	30,3	289,9	31,3	23,0	22,8	16,1	18,8	23,7	22,0
16:26	30,7	229,8	27,7	23,1	21,5	16,1	17,5	23,9	21,8
16:28	30,8	206,0	26,3	23,5	20,3	16,0	17,0	24,1	21,3
16:30	30,4	192,0	25,7	23,5	19,9	16,0	16,9	24,3	21,0
16:32	29,8	255,2	27,2	26,3	20,8	15,9	17,9	24,3	21,3
16:34	30,2	245,2	28,8	26,6	20,7	15,8	18,0	24,6	21,4
16:36	30,4	223,2	28,4	26,4	20,2	15,7	18,0	24,8	21,3
16:38	29,7	185,5	26,9	25,4	19,7	15,6	17,9	25,0	21,1
16:40	28,8	162,4	26,0	24,8	19,2	15,5	18,2	25,0	21,0
16:42	24,6	143,8	26,2	25,5	21,4	15,4	19,5	25,0	21,8
16:44	24,4	113,1	25,9	25,4	20,8	15,4	19,6	25,1	21,8
16:46	24,2	88,4	25,1	25,4	20,6	15,4	19,7	25,1	21,7
16:48	24,5	70,9	24,5	24,6	20,2	15,3	19,5	25,0	21,6
16:50	25,2	57,4	24,3	24,5	19,3	15,3	19,3	24,8	21,2
16:52	25,0	47,7	24,3	24,3	19,0	15,2	19,2	24,7	21,1
16:54	24,8	40,8	23,7	24,0	18,7	15,2	19,1	24,5	20,9
16:56	24,5	36,1	23,3	23,7	18,7	15,1	18,9	24,2	20,8
16:58	24,1	48,3	25,0	26,3	24,2	15,1	21,0	24,6	22,9
17:00	23,7	59,0	25,8	26,2	24,8	15,3	20,5	24,8	23,5
17:02	23,8	86,5	28,1	28,1	26,0	15,5	21,3	25,0	23,8
17:04	24,0	110,8	28,3	28,6	26,8	15,7	21,6	25,0	24,2
17:06	24,0	127,7	27,3	28,1	26,6	15,9	21,4	24,7	24,2
17:08	24,0	132,2	26,8	26,0	25,4	16,2	20,7	24,3	23,7
17:10	24,0	139,9	25,9	24,9	24,4	16,3	20,1	24,1	23,2
17:12	24,0	144,9	24,8	24,2	24,0	16,4	19,9	24,1	22,9
17:14	24,0	149,8	24,3	23,7	23,5	16,4	19,6	24,0	22,7
17:16	24,3	162,7	24,3	23,4	23,2	16,4	19,8	24,0	22,5
17:18	24,2	165,3	24,1	23,2	23,1	16,5	19,5	24,0	22,6
17:20	24,1	166,2	24,2	23,0	22,9	16,5	19,2	24,0	22,5
17:22	24,1	168,9	24,2	22,7	22,7	16,5	19,1	24,0	22,5
17:24	24,3	172,3	24,3	22,7	22,6	16,5	19,0	24,0	22,5
17:26	24,2	170,5	23,6	22,0	22,0	16,5	18,5	23,8	22,2
17:28	23,9	160,2	23,9	21,8	21,8	16,5	18,2	23,8	22,0

Quadro 23 - Temperaturas dos gases nos componentes do equipamento (teste experimental 7)

Tempo (horas)	Temperatura dos gases (°C)								
	Antes Fornalha	Antes Radiador	Exaustão Radiador	Após Radiador	Bulbo Molhado 1	Álcool	Após Refrigerador	Bulbo Seco	Bulbo Molhado 2
8:55	26,7	26,3	22,3	28,3	22,4	3,0	19,2	25,6	21,4
8:57	26,1	25,9	22,5	27,4	23,8	2,9	19,1	25,1	20,9
8:59	25,7	25,6	22,1	26,9	23,2	2,9	19,0	24,9	20,8
9:01	25,1	37,2	23,2	24,6	23,0	2,9	15,1	20,8	19,4
9:03	24,8	65,6	27,2	25,2	24,0	3,1	13,8	20,3	19,4
9:05	24,9	65,2	27,5	25,4	24,4	3,4	13,4	19,9	19,0
9:07	25,1	68,2	26,5	24,9	24,2	3,6	13,3	19,7	18,8
9:09	25,3	70,4	25,9	24,4	24,1	3,8	13,3	19,8	18,8
9:11	25,4	74,2	24,8	23,8	23,7	4,0	13,2	19,9	18,8
9:13	25,6	77,4	24,8	23,7	23,6	4,2	13,2	20,1	18,8
9:15	26,0	80,9	25,3	23,7	23,7	4,4	13,3	20,3	18,8
9:17	27,8	83,7	26,1	25,1	25,1	4,6	13,8	20,8	19,3
9:19	29,6	94,7	26,6	25,9	25,8	4,8	14,6	21,3	19,9
9:21	31,3	101,3	28,2	26,3	26,2	5,0	15,0	21,8	20,4
9:23	32,0	103,5	27,0	26,2	26,1	5,3	15,1	22,1	20,6
9:25	32,8	108,3	27,2	26,5	26,4	5,6	15,4	22,4	20,8
9:27	32,5	111,3	25,2	25,4	25,3	5,8	15,3	22,7	20,8
9:29	30,7	111,3	24,6	24,3	24,2	6,1	14,8	22,6	20,5
9:31	29,6	114,3	24,7	24,0	23,8	6,3	14,7	22,4	20,3
9:33	29,0	116,7	24,3	23,7	23,6	6,5	14,7	22,5	20,2
9:35	28,6	127,6	24,2	23,5	23,4	6,7	14,9	22,4	20,3
9:37	28,1	133,6	24,5	23,5	23,4	6,9	15,0	22,2	20,3
9:39	27,9	138,1	24,1	23,3	23,3	7,1	14,9	22,2	20,2
9:41	27,7	142,5	24,2	23,4	23,4	7,3	14,9	22,2	20,2
9:43	27,6	145,1	24,1	23,4	23,3	7,5	15,0	22,3	20,2
9:45	27,7	144,1	24,0	23,2	23,2	7,6	15,0	22,3	20,3
9:47	27,8	143,9	24,1	23,2	23,1	7,8	15,2	22,5	20,4
9:49	27,9	152,0	25,0	23,4	23,3	7,9	15,4	22,5	20,6
9:51	28,4	141,8	26,0	24,2	24,1	8,1	15,5	22,4	20,6
9:53	28,5	143,2	27,6	24,6	24,3	8,2	15,5	22,5	20,8
9:55	28,5	136,9	29,9	24,7	24,4	8,3	15,5	22,6	20,8
9:57	28,5	129,5	30,0	25,2	24,8	8,5	15,7	22,8	20,8
9:59	28,5	122,0	30,0	25,5	25,0	8,6	16,0	22,9	21,0
10:01	28,5	115,5	27,3	25,1	24,7	8,8	16,0	22,9	21,1
10:03	28,7	112,1	26,8	24,9	24,7	9,0	16,1	23,1	21,2
10:05	29,2	110,8	27,3	25,2	25,0	9,1	16,4	23,3	21,5
10:07	29,7	114,0	26,7	25,0	25,0	9,3	16,6	23,4	21,7
10:09	29,4	116,7	26,5	24,6	24,6	9,4	16,5	23,4	21,7
10:11	29,4	118,7	26,1	24,7	24,6	9,6	16,6	23,4	21,6
10:13	29,4	120,4	26,2	24,6	24,6	9,7	16,7	23,6	21,7
10:15	29,5	121,5	25,5	24,6	24,5	9,9	16,8	23,9	21,8
10:17	29,6	120,6	24,7	24,2	24,2	10,0	16,7	24,1	21,9
10:19	29,9	116,9	25,6	24,2	24,1	10,1	16,8	24,4	21,9
10:21	30,7	115,4	26,1	24,5	24,4	10,3	17,0	24,7	22,1
10:23	31,1	114,7	26,7	25,1	25,0	10,4	17,3	25,0	22,4
10:25	31,3	118,2	26,8	25,2	25,2	10,5	17,6	25,2	22,7
10:27	30,6	116,5	26,2	24,8	24,8	10,6	17,6	25,1	22,6
10:29	29,8	114,4	26,0	24,2	24,2	10,7	17,5	25,2	22,5
10:31	29,5	114,0	25,4	23,7	23,6	10,9	17,6	25,4	22,5
10:33	29,7	113,2	25,9	23,4	23,3	11,0	17,8	25,8	22,6
10:35	30,3	115,0	25,7	23,0	23,0	11,1	18,1	26,0	22,6
10:37	30,6	113,9	25,9	22,8	22,8	11,1	18,4	26,2	22,6
10:39	29,5	108,8	26,6	23,0	23,0	11,2	18,7	26,3	22,6
10:41	28,9	101,7	26,3	23,2	23,1	11,3	19,2	26,5	22,6

Quadro 24 – Temperaturas dos gases nos componentes do equipamento (teste experimental 8) realizado em 26/09/2000

Tempo (horas)	Temperatura dos gases (°C)								
	Antes Fornalha	Antes Radiador	Exaustão Radiador	Após Radiador	Bulbo Molhado 1	Álcool	Após Refrigerador	Bulbo Seco	Bulbo Molhado 2
9:29	14,8	14,6	14,8	14,9	12,2	1,9	12,6	16,2	14,8
9:31	14,9	14,6	14,9	14,9	12,1	1,8	12,7	16,2	14,8
9:33	14,9	14,6	14,9	15,0	13,1	1,8	12,7	16,2	14,8
9:35	14,9	20,0	15,0	15,4	13,7	1,7	8,3	12,8	12,4
9:37	15,0	49,6	16,8	17,6	16,4	1,8	10,6	14,0	13,0
9:39	15,2	91,8	21,1	19,3	17,7	2,0	10,8	14,3	13,6
9:41	15,5	84,4	20,2	17,9	17,0	2,1	9,6	14,0	13,5
9:43	15,8	97,7	19,4	18,0	16,9	2,2	9,4	13,9	13,4
9:45	16,1	106,9	19,6	17,9	16,9	2,3	9,5	13,9	13,4
9:47	16,4	119,0	19,6	17,9	16,8	2,5	9,6	14,0	13,4
9:49	16,7	127,4	19,4	18,0	16,9	2,6	9,6	14,1	13,6
9:51	17,0	137,5	19,7	18,0	16,9	2,7	9,8	14,2	13,7
9:53	17,2	149,8	19,2	17,7	16,9	2,8	9,8	14,3	13,8
9:55	17,3	161,7	19,1	17,6	16,8	2,9	9,9	14,4	13,9
9:57	17,6	170,5	18,6	17,3	16,8	3,1	10,0	14,5	13,9
9:59	17,8	178,2	18,3	17,1	16,6	3,2	10,0	14,6	14,0
10:01	18,0	187,4	18,3	17,0	16,6	3,3	10,0	14,7	14,0
10:03	18,2	188,8	17,6	16,8	16,5	3,4	10,1	14,8	14,0
10:05	18,3	195,8	18,4	16,8	16,4	3,5	10,1	14,8	14,0
10:07	18,5	201,6	18,3	16,8	16,4	3,6	10,1	14,9	14,1
10:09	18,7	211,7	18,5	16,8	16,4	3,7	10,2	15,0	14,2
10:11	18,8	221,4	17,8	16,7	16,2	3,8	10,2	15,0	14,2
10:13	18,9	221,8	18,0	16,7	16,3	3,9	10,3	15,0	14,2
10:15	19,0	225,4	18,6	16,7	16,3	4,0	10,3	15,0	14,3
10:17	19,3	230,1	19,2	16,9	16,6	4,1	10,5	15,1	14,4
10:19	19,5	227,2	19,4	17,0	16,6	4,2	10,5	15,2	14,5
10:21	19,8	210,8	18,9	16,7	16,5	4,3	10,2	15,2	14,5
10:23	20,1	210,2	18,6	16,7	16,5	4,4	10,2	15,3	14,5
10:25	20,2	204,5	18,2	16,5	16,4	4,5	10,2	15,4	14,5
10:27	20,5	272,9	22,5	20,2	18,7	4,5	12,3	15,7	15,1
10:29	20,9	192,1	21,5	19,6	19,2	4,8	11,6	15,7	15,5
10:31	21,1	128,0	23,7	21,0	19,9	5,0	12,6	16,2	15,8
10:33	21,2	214,8	28,1	23,7	20,6	5,2	12,7	16,4	16,0
10:35	21,5	191,8	25,9	24,5	21,5	5,4	13,0	16,6	16,3
10:37	21,6	183,2	23,6	22,8	20,8	5,5	12,9	16,6	16,4
10:39	21,6	185,5	22,3	21,1	19,7	5,8	12,6	16,4	16,2
10:41	21,8	187,0	21,2	20,0	19,0	5,9	12,2	16,3	16,0
10:43	21,9	188,7	19,9	19,1	18,3	6,0	12,1	16,3	15,8
10:45	22,0	188,6	19,5	18,4	17,8	6,2	11,9	16,3	15,7
10:47	22,0	192,8	19,2	18,0	17,6	6,3	11,8	16,3	15,6
10:49	22,0	191,0	19,3	17,7	17,3	6,4	11,8	16,4	15,6
10:51	22,0	196,0	19,3	17,7	17,3	6,5	11,8	16,4	15,5
10:53	22,2	198,0	19,2	17,7	17,3	6,5	11,8	16,5	15,6

Quadro 25 - Temperaturas no interior do silo (teste experimental 1 - data de início : 08/08/2000)

Horário de leitura (horas)	Posição de amostragem											
	1C	1M	2C	2M	2P	3C	3M	3P	4C	4M	4P	Ar ambiente
18:00	23,6	21,1	26,9	27,1	20,0	25,9	24,8	20,3	25,9	25,4	24,4	18,9
21:00	23,1	21,1	27,5	27,6	19,3	26,3	25,1	19,9	19,3	19,1	18,7	13,0
0:00	22,8	21,1	27,5	27,6	18,5	26,4	25,2	19,2	15,2	14,9	14,5	10,9
3:00	22,6	21,1	27,6	27,6	17,7	26,5	25,3	18,5	12,5	12,0	11,6	10,0
6:00	22,5	21,1	27,6	27,5	16,9	26,5	25,3	17,8	10,6	10,2	9,9	9,5
9:00	21,9	20,5	27,6	27,5	16,8	26,5	25,2	17,9	11,4	11,3	11,4	20,5
12:00	22,5	20,9	27,3	27,2	17,8	26,3	25,0	19,2	20,4	20,2	20,2	24,8
15:00	23,0	21,1	26,9	26,9	19,9	26,1	24,9	20,1	26,0	25,8	25,5	25,6
18:00	22,7	20,8	27,2	27,1	19,9	26,2	25,0	20,2	24,4	24,2	24,0	20,9
0:00	22,7	21,0	27,4	27,2	19,0	26,5	25,3	19,6	17,0	16,7	16,5	14,0
6:00	22,4	21,1	27,5	27,2	17,8	26,6	25,3	18,5	13,0	12,6	12,2	12,0
12:00	22,4	20,8	27,3	27,0	19,0	26,5	25,1	20,3	22,7	22,5	22,6	28,6
18:00	22,6	21,0	27,3	26,9	20,9	26,4	25,2	21,5	26,1	25,9	25,7	19,8
6:00	22,6	21,3	27,4	26,9	19,2	26,6	25,3	20,0	16,4	16,2	16,0	16,5
18:00	22,8	21,4	27,3	26,8	20,9	26,6	25,4	21,4	23,5	22,9	23,3	18,7
6:00	22,6	21,5	27,3	26,7	18,3	26,7	25,5	19,2	13,8	13,3	13,5	12,7
18:00	23,0	21,4	27,0	26,3	19,5	26,6	25,3	20,0	19,9	19,1	19,6	13,2
6:00	22,7	21,4	27,2	26,5	15,6	26,8	25,5	16,7	7,5	6,8	7,0	8,8
18:00	23,0	21,2	27,4	26,5	19,1	26,9	25,5	19,4	21,4	20,7	21,2	16,8
6:00	22,7	21,2	27,2	26,3	15,6	26,9	25,5	16,4	9,4	8,7	8,9	9,5

Quadro 26 - Temperaturas no interior do silo (teste experimental 2 - data de início : 15/08/2000)

Horário de leitura (horas)	Posição de amostragem											
	1C	1M	2C	2M	2P	3C	3M	3P	4C	4M	4P	Ar ambiente
18:00	23,1	20,7	26,6	25,5	19,0	26,7	25,2	18,6	23,1	22,9	22,6	17,0
0:00	22,7	20,6	26,9	25,8	17,8	27,0	25,5	17,7	14,2	13,9	13,5	10,7
6:00	22,5	20,7	27,0	25,7	16,4	27,0	25,5	16,7	10,3	9,9	9,6	9,2
12:00	22,4	20,5	26,9	25,6	17,3	27,0	25,5	18,5	20,3	20,2	20,3	25,4
18:00	22,6	20,4	26,6	25,4	19,7	27,0	25,2	19,8	26,0	25,8	25,7	22,8
6:00	22,4	20,5	27,0	25,5	18,5	27,2	25,4	18,9	16,3	16,1	15,9	15,2
18:00	22,4	20,5	27,0	25,5	20,4	27,2	25,4	20,5	24,4	24,3	24,0	19,2
18:00	22,5	20,6	26,8	25,2	20,3	27,2	25,4	20,2	25,6	25,4	25,2	20,0
6:00	22,5	20,8	26,8	25,1	18,7	27,3	25,4	19,0	15,7	15,5	15,3	16,3
18:00	22,4	20,6	27,0	25,2	21,3	27,4	25,4	21,2	25,0	24,8	24,6	20,7
6:00	22,6	21,0	26,7	25,0	18,6	27,3	25,3	18,9	15,4	15,2	15,1	17,4
18:00	22,8	20,9	26,6	24,9	20,6	27,3	25,3	20,7	23,6	23,5	23,2	17,5
6:00	22,7	21,1	26,5	24,8	17,4	27,3	25,3	18,2	11,4	11,0	10,7	10,3

Quadro 27 - Temperaturas no interior do silo (teste experimental 3 - data de início : 22/08/2000)

Horário de leitura (horas)	Posição de amostragem											
	1C	1M	2C	2M	2P	3C	3M	3P	4C	4M	4P	Ar ambiente
18:00	16,3	22,6	20,7	26,2	24,5	20,7	27,1	25,0	20,7	24,6	24,3	17,7
0:00	10,6	22,7	21,0	26,5	24,8	19,2	27,4	25,2	19,7	15,8	15,4	11,3
6:00	8,5	22,4	21,1	26,5	24,7	17,1	27,4	25,2	17,9	10,1	9,6	8,3
12:00	18,6	22,4	20,9	26,3	24,6	18,0	27,3	25,0	18,5	17,6	17,5	23,5
0:00	12,2	22,7	21,0	26,4	24,6	19,5	27,4	25,2	19,5	16,4	16,1	13,3
12:00	21,5	22,5	20,9	26,2	24,4	19,1	27,3	25,0	20,0	22,2	22,2	27,0
0:00	13,1	22,7	21,0	26,2	24,5	20,3	27,3	24,9	20,6	18,6	18,2	13,3
12:00	22,1	22,6	21,1	26,2	24,4	19,8	27,3	24,9	20,9	23,6	23,5	28,5
0:00	14,9	22,8	21,3	26,1	24,4	21,2	27,3	24,9	21,4	19,8	19,5	15,5
12:00	21,6	22,7	21,5	26,1	24,4	20,9	27,3	24,9	21,8	25,1	25,0	28,2
0:00	16,0	22,9	21,9	26,2	24,6	22,0	27,3	24,9	22,2	20,7	20,4	16,9
12:00	23,1	23,0	21,8	26,0	24,3	21,9	27,2	24,9	22,9	26,6	26,6	29,3
0:00	20,3	23,1	22,0	26,0	24,4	22,8	27,2	24,9	23,4	24,0	23,8	20,2
12:00	29,9	23,1	22,2	25,9	24,3	22,9	27,0	24,8	23,7	26,8	26,7	29,6

Quadro 28 - Temperaturas no interior do silo (teste experimental 4 - data de início : 29/08/2000)

Horário de leitura (horas)	Posição de amostragem										
	1C	1M	2C	2M	2P	3C	3M	3P	4C	4M	Ar ambiente
18:00	22,6	22,4	25,9	24,5	20,3	27,0	24,9	21,0	18,2	17,8	17,4
0:00	22,8	22,4	25,9	24,5	20,1	27,1	25,0	20,7	17,4	17,2	17,8
6:00	22,9	22,3	25,9	24,5	19,7	27,0	24,9	20,2	17,1	16,8	16,7
12:00	22,9	22,2	25,8	24,4	20,2	27,0	24,9	20,6	20,7	20,8	20,9
18:00	23,0	22,1	25,8	24,4	21,0	26,9	24,8	21,1	22,4	22,3	19,5
6:00	23,0	22,1	25,8	24,4	20,2	26,9	24,8	20,4	17,7	17,5	17,4
18:00	23,0	22,1	25,8	24,4	21,3	26,9	24,7	21,3	23,2	23,1	19,5
6:00	22,9	22,0	25,7	24,3	20,0	26,8	24,7	20,3	17,0	16,8	18,5
18:00	22,9	22,2	25,8	24,4	22,0	26,8	24,6	21,6	25,3	25,2	21,1
6:00	23,0	22,0	25,6	24,3	20,3	26,7	24,6	20,4	18,2	18,0	18,2
18:00	23,0	22,1	25,7	24,3	20,7	26,7	24,6	20,6	20,1	20,0	18,0
6:00	23,0	21,9	25,6	24,3	20,0	26,6	24,5	20,0	18,4	18,3	18,5
18:00	23,1	21,7	25,5	24,2	20,2	26,5	24,4	20,1	19,7	19,5	18,4

Quadro 29 - Temperaturas no interior do silo (teste experimental 5 - data de início : 05/09/2000)

Horário de leitura (horas)	Posição de amostragem										
	1C	1M	2C	2M	2P	3C	3M	3P	4C	4M	Ar ambiente
18:00	22,6	21,2	25,3	24,1	19,2	26,3	24,1	19,3	21,8	21,7	20,3
0:00	22,6	21,2	25,4	24,2	18,6	26,3	24,1	18,8	16,8	16,6	14,5
6:00	22,6	21,1	25,3	24,1	18,2	26,3	24,1	18,4	15,9	15,7	16,5
12:00	22,5	21,1	25,3	24,1	18,3	26,3	24,1	18,4	17,1	16,9	16,9
18:00	22,5	21,0	25,3	24,1	18,5	26,3	24,0	18,4	17,6	17,5	15,4
6:00	22,4	20,9	25,3	24,0	18,6	26,2	24,0	18,3	18,5	18,8	15,8
18:00	22,4	20,8	25,3	24,0	18,7	26,2	23,9	18,4	19,4	19,3	17,0
6:00	22,3	20,6	25,1	23,9	17,9	26,1	23,8	17,8	15,3	15,0	16,0
18:00	22,1	20,9	25,4	24,0	20,6	26,0	23,6	19,4	24,3	24,2	17,9
12:00	22,3	20,6	24,9	23,6	20,6	25,7	23,5	20,0	22,4	22,4	21,8

Quadro 30 - Temperaturas no interior do silo (teste experimental 6 - data de início : 12/09/2000)

Horário de leitura (horas)	Posição de amostragem										
	1C	1M	2C	2M	2P	3C	3M	3P	4C	4M	Ar ambiente
18:00	22,6	20,4	24,8	23,4	20,8	25,4	23,2	20,1	22,6	22,3	18,5
8:00	22,3	20,6	24,9	23,5	19,2	25,6	23,4	18,9	15,8	15,7	18,6
8:00	22,3	20,6	24,8	23,4	19,6	25,5	23,4	19,7	16,9	16,8	18,7
8:00	22,3	20,9	24,7	23,4	20,9	25,4	23,3	20,8	19,6	19,4	20,3
8:00	22,3	21,3	24,7	23,3	21,3	25,3	23,4	21,0	18,8	18,7	21,1
8:00	22,6	21,4	24,4	23,2	23,0	25,2	23,5	22,5	26,4	26,5	26,7
8:00	22,6	21,7	24,6	23,4	21,5	25,1	23,5	21,6	19,4	19,3	20,6
8:00	22,8	21,9	24,6	23,4	21,6	25,1	23,6	21,7	18,8	18,7	19,7

Quadro 31 - Temperaturas no interior do silo (teste experimental 7 - data de início : 19/09/2000)

Horário de leitura (horas)	Posição de amostragem										
	1C	1M	2C	2M	2P	3C	3M	3P	4C	4M	Ar ambiente
12:00	22,8	21,8	24,4	23,3	24,0	25,0	23,5	23,4	30,6	30,6	27,2
8:00	22,7	21,9	24,5	23,4	21,3	25,1	23,6	21,4	18,0	17,9	20,4
8:00	22,6	21,9	24,4	23,4	21,1	25,0	23,6	21,3	17,6	17,6	21,4
8:00	22,7	22,0	24,4	23,4	21,3	25,0	23,6	21,0	18,0	17,9	20,7
8:00	22,6	22,2	24,4	23,4	22,0	24,9	23,6	22,2	22,5	22,4	24,8
8:00	22,7	22,3	24,3	23,5	21,6	24,9	23,6	21,9	21,6	21,5	23,6
8:00	22,8	22,4	24,4	23,6	21,1	24,9	23,6	21,8	19,5	19,4	25,9
8:00	22,9	22,4	24,3	23,6	20,0	24,8	23,6	20,9	15,7	15,4	14,1

Quadro 32 - Temperaturas no interior do silo (teste experimental 8 - data de início : 26/09/2000)

Horário de leitura (horas)	Posição de amostragem										
	1C	1M	2C	2M	2P	3C	3M	3P	4C	4M	Ar ambiente
14:00	21,9	22,4	24,3	23,7	19,3	24,8	23,6	20,1	15,9	15,7	15,3
8:00	22,3	22,0	24,3	23,6	17,9	24,7	23,5	18,4	15,6	15,5	15,8
8:00	22,3	21,4	24,1	23,5	18,2	24,6	23,4	18,5	16,7	16,6	18,5
8:00	22,2	21,3	24,2	23,5	19,1	24,5	23,2	19,6	18,2	18,1	21,7
8:00	22,1	21,4	24,2	23,4	19,4	24,4	23,1	19,7	18,5	18,4	20,1
8:00	22,2	21,4	24,3	23,5	20,3	24,4	23,0	19,9	18,8	18,7	22,7
8:00	22,4	21,5	24,1	23,5	20,9	24,3	23,0	20,4	19,4	19,3	20,5

## APÊNDICE B

Quadro 1. Teor de umidade do milho utilizado no experimento, quando transferido para o silo experimental.

Repetição	Teor de Umidade (% b.u.)
1	11,8
2	11,9
3	11,8
Teor de umidade médio (% b.u.)	11,8

Quadro 2. Percentagem de impurezas do milho utilizado no experimento.

Repetição	Percentagem de Impurezas (%)
1	0,33
2	0,35
3	0,36
Percentagem média de impurezas (%)	0,35

Quadro 3. Testes de vigor e de germinação do milho utilizado no experimento.

	Repetição	Teste Vigor (%)	Teste Germinação (%)
Testemunha Inicial	1	91,5	92,0
	2	94,0	94,5
	3	95,5	96,5
	Média	93,7	94,3
Testemunha Final	1	85,5	90,0
	2	83,0	88,5
	3	90,5	93,5
	Média	86,3	90,7
Tratamento Final	1	89,0	93,0
	2	91,5	95,0
	3	87,3	94,0
	Média	89,3	94,0

Quadro 4. Teor de umidade do milho no decorrer do experimento.

Dias	Posição de amostragem no silo								Média	Desvio Padrão
	1A	1B	2A	2B	3A	3B	4A	4B		
0	12,10	11,85	11,96	11,80	11,83	12,08	12,10	12,01	11,97	0,13
15	12,05	11,97	12,00	11,97	11,94	11,97	12,12	12,31	12,04	0,12
30	10,79	10,46	10,59	10,68	10,65	10,73	10,71	11,37	10,75	0,27
45	12,40	12,66	12,52	12,56	12,62	12,44	12,63	12,67	12,56	0,10
60	11,75	11,38	11,46	11,37	11,33	11,26	11,60	12,44	11,57	0,38

Quadro 5. Índice de absorção de água e poder de inchamento da farinha do milho utilizado no experimento.

		Índice de Absorção de Água (g/g)	Poder de Inchamento (g/g)	
			50°C	100°C
Testemunha	1	2,23	2,40	6,79
	2	2,10	2,36	7,10
	3	2,12	2,39	6,87
	Média	2,15	2,38	6,92
	Desvio padrão	0,09	0,02	0,16
Tratamento	1	2,30	2,26	6,60
	2	2,22	2,35	6,88
	3	2,24	2,30	6,78
	Média	2,25	2,30	6,75
	Desvio padrão	0,04	0,05	0,14

Quadro 6. Índice de solubilização da farinha do milho utilizado no experimento.

		Índice de Solubilização (%)		
		Temperatura Ambiente (°C)	50°C	Temperatura de Ebulição (°C)
Testemunha	1	4,43	6,79	11,68
	2	4,45	7,10	11,62
	3	4,22	6,87	11,60
	Média	4,37	6,92	11,63
	Desvio padrão	0,12	0,16	0,04
Tratamento	1	4,63	6,60	12,91
	2	4,07	6,88	13,32
	3	4,57	6,78	13,37
	Média	4,42	6,75	13,20
	Desvio padrão	0,31	0,14	0,25

Quadro 7. Resultado da contagem do número de insetos nas amostras.

Posição de Amostragem		Dias de realização da contagem após a amostragem						N. total Insetos	
		36	41	46	51	56	61		66
Testemunha	1A	21	2	0	2	7	13	35	80
	1B	18	2	0	3	3	15	18	59
	2A	10	0	0	0	0	4	8	22
	2B	22	2	3	27	28	28	51	161
	3A	20	0	1	0	1	0	4	26
	3B	13	1	1	0	2	0	1	18
	4A	12	4	2	0	0	2	9	29
	4B	16	5	4	2	0	4	11	42
Amostragem com 15 dias	1A	16	1	2	0	0	3	1	23
	1B	10	0	0	0	0	1	2	13
	2A	9	0	0	0	0	1	0	10
	2B	7	1	0	0	0	0	0	8
	3A	9	1	0	0	0	0	0	10
	3B	10	4	0	0	0	0	0	14
	4A	9	1	0	1	0	0	0	11
	4B	12	2	1	0	0	1	0	16
Amostragem com 30 dias	1A	6	0	1	2	0	0	0	9
	1B	5	1	0	0	0	0	0	6
	2A	6	0	0	0	0	0	0	6
	2B	5	0	0	0	0	0	0	5
	3A	3	0	0	0	0	0	0	3
	3B	5	0	0	0	0	0	0	5
	4A	4	0	0	0	0	0	0	4
	4B	3	0	0	0	0	0	0	3
Amostragem com 45 dias	1A	2	0	0	0	0	0	1	3
	1B	9	0	0	0	0	0	0	9
	2A	4	0	0	0	0	0	0	4
	2B	6	0	0	0	0	0	0	6
	3A	2	0	0	0	0	0	0	2
	3B	4	0	0	0	0	0	0	4
	4A	3	0	0	0	0	0	0	3
	4B	9	0	0	0	0	0	0	9
Amostragem com 60 dias	1A	6	0	0	0	1	1	5	13
	1B	1	0	0	0	0	0	0	1
	2A	2	0	0	0	0	0	1	3
	2B	4	0	0	0	0	2	1	7
	3A	1	0	0	0	0	0	0	1
	3B	4	1	0	0	0	0	1	6
	4A	1	0	0	0	0	0	0	1
	4B	6	1	0	0	0	0	0	7