Universidade Estadual Paulista
"Júlio de Mesquita Filho"
Campus de Guaratinguetá

Emiliana Bastos de Amorim

Gases de efeito estufa produzidos pela combustão de biomassa

Guaratinguetá
2012

Emiliana Bastos de Amorim

GASES DE EFEITO ESTUFA PRODUZIDOS PELA COMBUSTÃO DE BIOMASSA

Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Mecânica na área de Transmissão e Conversão de Energia.

Orientador: Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Junior

Coorientador: Prof. Dr. Turibio Gomes Soares Neto

Guaratinguetá

2012

Amorim, Emiliana Bastos
A524g Gases de efeito estufa produzidos pela combustão de biomassa / Emiliana Bastos Amorim.- Guaratinguetá : [s.n.], 2012
114 f.: il.
Bibliografia: f. 107-114

Tese (Doutorado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2012
Orientador: Prof. Dr. João Andrade Carvalho Junior
Co-orientador: Prof. Dr. Turibio Gomes Soares Neto

1. Gases estufa 2. Combustão 3. Biomassa I. Título

CDU 621.6.02

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

EMILIANA BASTOS DE AMORIM

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: TRANSMISSÃO E CONVERSÃO DE ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. JOÃO ANDRADE DE CARVALHO JUNIOR
Orientador / Unesp-Feg

Prof. Dr. MAURICIO ARAUJO ZANARDI
Unesp-Feg

Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI
Unesp-Feg

Profª. Drª. KARLA MARIA LONGO DE FREITAS
INPE

Prof. Dr. ELY VIEIRA CORTEZ
INPE

Agosto de 2012

DADOS CURRICULARES

EMILIANA BASTOS DE AMORIM

NASCIMENTO	30/05/1982 – Cachoeira Paulista/SP
FILIAÇÃO	Paulo Roberto Estevam de Amorim Elza Maria Santos Bastos de Amorim
2000/2003	Curso de Graduação Matemática (Licenciatura) – Unisal/Lorena
2004/2006	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Química, nível de Mestrado, na Universidade de São Paulo, Campus de Lorena/SP.
2007/2012	Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Doutorado, na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da Universidade Estadual Paulista.

Dedico este trabalho aos meus pais, Paulo e Elza, que sempre acreditaram em mim.
Ao meu marido, Marcílio.
Ao meu irmão, Henrique.

AGRADECIMENTOS

Agradeço todos os dias a Deus, pelo dom da vida e pela oportunidade recebida.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Jr e ao meu coorientador Prof. Dr. Turibio Gomes Soares Neto, pela ajuda, oportunidade, incentivo e apoio.

Agradeço a minha mãe pela compreensão, carinho e paciência.

Agradeço ao meu marido, pelo apoio dado.

Agradeço ao meu grande amigo Flávio Augusto Dias de Oliveira, que me convenceu a cursar o Doutorado.

Aos meus novos grandes amigos: Edson Anselmo, Victor Orui Saito, João Paulo de Abreu Cruz, Fabiana Ferrari Dias, Adriane Augusto D'Avila de Oliveira, sem os quais eu não teria conseguido chegar ao final.

Agradeço aos funcionários da FEG/UNESP e do LCP/INPE, principalmente ao Dr. Ely Vieira Cortez e ao técnico José Carlos de Andrade, por toda a atenção e ajuda prestada.

“Eu não vim até aqui pra desistir agora...
... E se depender de mim eu vou até o fim.”

(Engenheiros do Hawaii)

AMORIM, E. B., **Gases de efeito estufa produzidos pela combustão de biomassa.** 2012. 114 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

Um dos principais efeitos das queimadas na Floresta Amazônica é a liberação de grandes quantidades de carbono para a atmosfera como resultado da queima de biomassa. Esse carbono contribui para o aquecimento global através do efeito estufa. Entre 2000 e 2011, a taxa média de desmatamento na floresta Amazônica foi de 15815 km²/ano. Realizou-se então um experimento com a finalidade de simular uma queimada real da Floresta Amazônica para estimar as emissões dos principais gases da combustão de sua biomassa. A taxa de consumo de biomassa calculada foi de 23,5% para troncos largos e de 89,2% para galhos finos. As médias para os fatores de emissão de CO_2, CO, CH_4, NMHC, e $MP_{2,5}$, calculados para 3 horas de amostragem, foram respectivamente de 1513 ± 151; 157 ± 53; 8,2 ± 4,7; 3,9 ± 2,3 e 1,9 ± 2 g/kg para queima de biomassa seca. Calculou-se que um hectare de floresta queimada produziu cerca de 232115 kg de CO_2, 24141 kg de CO, 1254 kg de CH_4, 596 kg de NMHC e 285 kg de $MP_{2,5}$. Assim, tem-se que a quantidade de CO_2 liberado para a atmosfera levando-se em consideração a taxa de desmatamento de 15815 km²/ano é 457 Mt/ano. Esta taxa corresponde a 0,91% das emissões globais de gases do efeito estufa. Realizaram-se também experimentos em laboratório com o intuito de comparar os resultados obtidos em Alta Floresta no ano de 2004 e em Cruzeiro do Sul no ano de 2010 com possíveis simulações em laboratório em que a escala, a devastação e a poluição seriam menores; nestes experimentos também foram avaliados quais fatores (diâmetro do tronco, inclinação da bandeja e vazão) mais influenciariam na emissão de gases poluentes. A biomassa escolhida para a queima em laboratório foi o eucalipto, espécie muito comum na região - Vale do Paraíba. Utilizou-se a técnica de cromatografia e analisadores de gases para calcular a concentração média em ppm dos gases emitidos, encontrando os seguintes valores médios: média para os fatores de emissão de CO_2: 1437 ± 119 g/kg (pela cromatografia) e 1363 ± 117 g/kg (pelo analisador de gás), valores estes bem próximos aos publicados na literatura. Além dos cálculos dos fatores de emissão e da eficiência da combustão e com o intuito de verificar qual variável (diâmetro do tronco, inclinação da bandeja e vazão do ar) mais interferiu na emissão de gases, realizou-se um estudo estatístico no qual se observou que o fator que mais interferiu na emissão de gases poluentes, principalmente do CO_2, que colabora para o aumento do efeito estufa, foi o diâmetro do tronco.

Palavras chave: Efeito estufa. Combustão de biomassa. Fatores de emissão. Teste t.

AMORIM, E. B., **Greenhouse gases produced by burning biomass.** 2012. 114 f. Doctorate Thesis in Mechanical Engineering – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2012.

One of the main effects of burning areas of the Amazon Forest is release of large amounts of carbon into the atmosphere as a result of burning biomass. This carbon contributes to global warming by means of the greenhouse effect. Between 2000 and 2011, the average deforestation rate in the Amazon was 15,815 km^2 $year^{-1}$. An experiment was carried out to simulate real burning in the Amazon in order to estimate emission of the main gases released by combustion of its biomass. The rate of consumption of biomass was 23.5% for large trunks and 89.2% for fine branches. Average emission factor when burning dry biomass was 1,513 ± 151 g kg^{-1} for CO_2; for CO it was 157 ± 53 g kg^{-1}; for CH_4 it was 8.2 ± 4.7 g kg^{-1}; for NMHC it was 3.9 ± 2.3 g kg^{-1}; and for PM2.5 it was 1.9 ± 2 g kg^{-1}. Calculation revealed that a hectare of burned forest produced 232,115 kg of CO_2, 24,141 kg of CO, 1,254 kg of CH_4, 596 kg of NMHC, and 285 kg of PM2.5. Thus the quantity of CO_2 released into the atmosphere is 457 Mt $year^{-1}$, considering deforestation of 15,815 km^2 $year^{-1}$. This rate is equivalent to 0.91% of global greenhouse gas emissions. Laboratory tests were also carried out in order to compare results obtained in Alta Floresta (2004) and Cruzeiro do Sul (2010) with possible laboratory simulations in which the scale would be smaller and there would be less devastation and pollution; these experiments were also analyzed which factors (trunk diameter, tray slope, and flow rate) influenced gaseous pollution emissions. Biomass chosen for the laboratory burn was eucalyptus, a species that is very common in the Paraiba Valley. Gas Chromatography and specific analyzers were utilized to calculate concentration in PPM of the main gases emitted. The following average values were found for emission factors for CO_2: 1,437 ± 119 g kg^{-1} (by chromatography) and 1,363 ± 117 g kg^{-1} (by specific analyzer). These values are very close to what is found in the literature. In addition to the emission factor and combustion efficiency calculations, a statistical study was carried out in order to verify which parameter (trunk diameter, tray slope, and air flow) influenced gas emissions most. This analysis observed that trunk diameter was the factor among those studied that most influenced gaseous pollution emissions, mainly CO_2, which collaborate to increase the greenhouse effect.

Keywords: Greenhouse effect. Biomass burning. Emissions factors. T test.

Lista de Figuras

Figura 1 Formação do efeito estufa. (SUZANO, 2012) 23
Figura 2 Emissão dos gases do efeito estufa de origem antropogênica (BARKER *et al*, 2007) 24
Figura 3 Ranking Internacional de Emissões de GEE (SALSA, 2009) 26
Figura 4 Fases da combustão de biomassa: ignição, chama e incandescência . 28
Figura 5 Esquema de um cromatógrafo (DEL GRANDE, 2012) 34
Figura 6 Detalhe da retenção dos gases no interior da coluna (DEL GRANDE, 2012) 34
Figura 7 Esquema do FID (LINDE, 2008) 35
Figura 8 Modelo do processo utilizado, baseado no modelo de Montgomery (1991) e Galdamez (2002) 36
Figura 9 Arco de desmatamento na região Amazônica e a localização de Alta Floresta 39
Figura 10 Esquema da área de realização da queimada em Cruzeiro do Sul/AC 41
Figura 11 Torre e instalação dos equipamentos no ponto A 42
Figura 12 *Manifold* e eletroválvulas 42
Figura 13 Filtro para retenção do material particulado 43
Figura 14 Caixa de abrigo instalada no topo da torre a 100 m da mesa de comando: *manifold*, eletroválvulas, filtros e pré-filtros para retenção de materiais particulados 43
Figura 15 Passagem da fiação elétrica e tubulação de gás 44
Figura 16 Tubulação e fiação elétrica enterradas 44
Figura 17 Esquema da disposição dos componentes do sistema de amostragem de gases na mesa de comando 45
Figura 18 Mesa de comando do sistema de amostragem de gases montada e fixada em placa de acrílico 46
Figura 19 Instalação da mesa de comando no campo 46
Figura 20 Focos de incêndio registrados por satélites (Fonte: Cptec – INPE) ... 47

Figura 21 50 focos de incêndio registrados no estado do Acre no dia 09/09/2010 (DPI, 2010) 48
Figura 22 Localização do experimento – foco não detectado pelos satélites (DPI, 2010) 48
Figura 23 Preparação para o início do incêndio 49
Figura 24 Área a ser queimada 50
Figura 25 Início do fogo 50
Figura 26 Frente da linha do fogo 51
Figura 27 Fase chama 51
Figura 28 Labareda de fogo e pluma de fumaça 52
Figura 29 Emissão de material particulado 52
Figura 30 Fase de incandescência 53
Figura 31 Fim da queima controlada 53
Figura 32 Visão do *container* (OLIVEIRA, 2008) 55
Figura 33 Dimensões do *container* (SOARES NETO, 2011) 55
Figura 34 Balança, bandeja inclinável e coifa (OLIVEIRA, 2008) 56
Figura 35 Controlador de rotação do exaustor localizado no interior do *container* 57
Figura 36 Posicionamento das sondas, do termopar e do tubo de Pitot no interior da chaminé 57
Figura 37 Vista geral dos filtros 58
Figura 38 Coleta dos gases e banho em água a 5 °C 59
Figura 39 Mesa de comando do sistema de amostragem de gases e pressurização das garrafas 59
Figura 40 Painel do *rack* da linha de amostragem 60
Figura 41 Banho com armadilha, para remoção de alcatrão e água 60
Figura 42 Analisadores de gases de CO_2, CO, NO_x e UHC (OLIVEIRA, 2008) 61
Figura 43 Variação dos diâmetros dos troncos 62
Figura 44 Variação da inclinação da bandeja a 0° e a 10° 63
Figura 45 Vista do medidor de vazão 63

Figura 46 Disposição da biomassa sobre a bandeja antes da queima 64
Figura 47 Melhor maneira de intercalar os galhos 64
Figura 48 Montagem da biomassa sobre a bandeja e pesagem das amostras 65
Figura 49 Ignição com a utilização de um maçarico alimentado por GLP 65
Figura 50 Mesa de comando do sistema de amostragem de gases para posterior análise cromatográfica 65
Figura 51 Anotação dos dados durante os testes 66
Figura 52 Exemplo de planilha preenchida 66
Figura 53 Programa da temperatura do forno da coluna durante o processo de cromatografia 67
Figura 54 Padrão e garrafas acoplados à linha de transmissão: amostra x cromatógrafo 68
Figura 55 Vista geral do cromatógrafo da *PerkimElmer* 69
Figura 56 Comparação entre a concentração de CO e CH4 obtidos por análise cromatográfica 71
Figura 57 Comparação entre a concentração de CO e NMHC obtidos por análise cromatográfica 71
Figura 58 Comparação entre a concentração de CO e C_2 obtidos por análise cromatográfica 72
Figura 59 Comparação entre a concentração de CO e C_3 obtidos por análise cromatográfica 72
Figura 60 Comparação entre a concentração de CO e $MP_{2,5}$ obtidos por análise cromatográfica 73
Figura 61 Correlação entre FE de CO com ECM comparando dados da literatura com os resultados obtidos em Cruzeiro do Sul 74
Figura 62 Correlação entre FE de CO_2 com ECM comparando dados da literatura com os resultados obtidos em Cruzeiro do Sul 74
Figura 63 Correlação entre FE de CH_4 com ECM comparando dados da literatura com os resultados obtidos em Cruzeiro do Sul 75
Figura 64 Comparação entre os fatores de emissão de CO e CH_4 76
Figura 65 Fases do experimento (1) 78

Figura 66 Fases do experimento *a* 78
Figura 67 Fases do experimento *b* 78
Figura 68 Fases do experimento *ab* 79
Figura 69 Fases do experimento *c* 79
Figura 70 Fases do experimento *ac* 79
Figura 71 Fases do experimento *bc* 80
Figura 72 Fases do experimento *abc* 80
Figura 73 Dados normalizados do experimento (1) 84
Figura 74 Dados normalizados do experimento *a* 85
Figura 75 Dados normalizados do experimento *b* 85
Figura 76 Dados normalizados do experimento *ab* 86
Figura 77 Dados normalizados do experimento *c* 86
Figura 78 Dados normalizados do experimento *ac* 87
Figura 79 Dados normalizados do experimento *bc* 88
Figura 80 Dados normalizados do experimento *abc* 88
Figura 81 Ilustração de um experimento *abc* 91
Figura 82 Correlação entre a ECM e os FE do CO, dados pela aquisição nos analisadores de gases e por cromatografia 96
Figura 83 Correlação entre a ECM e os FE do CO_2 dados pela aquisição nos analisadores de gases e por cromatografia 96
Figura 84 Gráfico dos efeitos A, B e C em relação ao fator de emissão de CO 99
Figura 85 Gráfico das interações em relação ao fator de emissão de CO 99
Figura 86 Gráfico dos efeitos A, B e C em relação ao fator de emissão CH_4 ... 100
Figura 87 Gráfico das interações em relação ao fator de emissão de CH_4 101
Figura 88 Gráfico dos efeitos A, B e C em relação ao fator de emissão CO_2 ... 102
Figura 89 Gráfico das interações em relação ao fator de emissão de CO_2 103

Lista de Tabelas

Tabela 1 Fontes dos principais gases do efeito estufa 25
Tabela 2 Fatores de emissão em experimentos de campo (SOARES NETO, *et al.*, 2011) 31
Tabela 3 Sinais para o cálculo dos efeitos e interações num planejamento fatorial 2^3 (MONTGOMERY, 2004) 37
Tabela 4 Efeito dos fatores (SILVA, 2007) 37
Tabela 5 Modelo e escala dos analisadores 61
Tabela 6 Método EMI 67
Tabela 7 Concentração dos padrões de calibração (ppm) 68
Tabela 8 Fatores de Emissão (g/kg de biomassa seca) 70
Tabela 9 Eficiências de Combustão 73
Tabela 10 Quantidade de carbono emitido em Cruzeiro do Sul 75
Tabela 11 Valores médios dos experimentos 80
Tabela 12 Teor de umidade para cada experimento 81
Tabela 13 Concentração média líquida dos gases em ppm 82
Tabela 14 Quantidade de carbono em mg/m^3 emitido associado a cada gás 82
Tabela 15 Fator de emissão (FE) em g/kg 83
Tabela 16 Eficiência de combustão e eficiência de combustão modificada dada pelos analisadores de gases 89
Tabela 17 Valores médios dos experimentos realizados 90
Tabela 18 Concentração dos gases em ppm obtidos por cromatografia 92
Tabela 19 Concentração média líquida dos gases em ppm obtidos por cromatografia 92
Tabela 20 Quantidade de carbono em mg/m^3 emitido associado a cada gás 93
Tabela 21 Fator de emissão (FE) em g/kg 93
Tabela 22 Eficiência de combustão e eficiência de combustão modificada 94
Tabela 23 Coeficiente de variação entre os cálculos dos fatores de emissão 94
Tabela 24 Comparação entre a eficiência de combustão e a eficiência de combustão modificada 95

Tabela 25 Comparação de resultados 97
Tabela 26 Teste t dos efeitos dos fatores de emissão do CO 98
Tabela 27 Teste t dos efeitos dos fatores de emissão de CH_4 100
Tabela 28 Teste t dos efeitos dos fatores de emissão de CO_2 101

Lista de Siglas e Abreviaturas

AC	Acre
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
BG	*Background*
CFC	Clorofluorcarbono
CG	Cromatografia gasosa
CV	Coeficiente de Variação
DAP	Diâmetro à altura do peito
DIV	Diâmetro do tronco, Inclinação da bandeja e Vazão do ar
EC	Eficiência de combustão
ECM	Eficiência de combustão modificada
EUA	Estados Unidos da América
FASS	Fire Atmosphere Sampling System (Sistema de Amostragem de fogo atmosférico)
FE	Fator de emissão
FEG	Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá
FID	*Flame Ionization Detection* (Detector de Ionização de Chama)
GEE	Gás de Efeito Estufa
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
HC	Hidrocarbonetos
HFC	Hidrofluorcarbono
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPAM	Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima
LCP	Laboratório de Combustão e Propulsão
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MP	Material particulado
NMHC	Hidrocarbonetos não metanos
PFA	*Perfluoroalkoxy* (Polímero com alto ponto de fusão)
PFC	Perfluorcarbono

PPB	Partes por bilhão
PPM	Partes por milhão
UHC	Hidrocarbonetos não queimados
UNESP	Universidade Estadual Paulista

Lista de Símbolos

$[]_X$	Concentração média de X (ppmv)
[CO]	Concentração do carbono emitido como CO
$[CO_2]$	Concentração do carbono emitido como CO_2
$[C_{total}]$	Concentração do carbono total emitido
atm	Atmosfera
C	Carbono
c	Chama
C_2	Etano, Eteno e Etino
C_2H_2	Acetileno
C_2H_6	Etano
C_3	Propano, Propeno e Propino
CH_4	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
i	Incandescência
$m_{(combustível\ em\ base\ seca)}$	Massa do combustível em base seca (kg)
M_i	Massa inicial
M_s	Massa seca
M_X	Massa molar (g/mol)
N_2O	Óxido nitroso
NO_x	Óxidos de Nitrogênio
SF_6	Hexafluoreto de enxofre
$V_{total\ -\ chaminé}$	Volume total de gases que flui pela chaminé (m^3)
V_x	Volume molar de 1 mol a 0 °C e 1 atm (L/mol)
W%	Teor de umidade em base seca

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 20
1.1 Objetivos 21
1.2 Estrutura da tese 21

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22
2.1 Efeito estufa 22
2.2 Combustão de biomassa 26
2.2.1 Cálculo do teor de umidade 29
2.2.2 Fator de emissão 30
2.2.3 Quantidade carbono associado a cada gás 32
2.2.4 Eficiência de combustão e eficiência de combustão modificada 32
2.3 Cromatografia gasosa 33
2.4 Planejamento de experimentos 35
2.4.1 Planejamento fatorial 2^3 36
2.5 Informações sobre o experimento realizado em Alta Floresta 38

3 METODOLOGIA 41
3.1 Amostragem dos gases em Cruzeiro do Sul, Acre 41
3.2 Amostragem dos gases em laboratório 54
3.2.1 Combustão de eucalipto em laboratório 62
3.2.2 Cromatografia Gasosa 66

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO 70
4.1 Comparação de resultados: Cruzeiro do Sul (2010) e Alta Floresta (2004) 70
4.1.1 Consumo de biomassa e fatores de emissão 76
4.2 Experimentos em laboratório 77
4.2.1 Análise dos resultados obtidos pelos analisadores de gases 81
4.2.2 Análise dos resultados obtidos por cromatografia 89

4.3 Análise estatística dos fatores de emissão.....97
4.3.1 Estudo estatístico para os fatores de emissão dos gases calculado por cromatografia.....98
4.4 Consumo de biomassa e fatores de emissão extrapolados para uma floresta de eucalipto..... 103

5 CONCLUSÕES 105

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 107

1 INTRODUÇÃO

Um dos principais efeitos das queimadas e incêndios florestais na Amazônia é a liberação de grandes quantidades de carbono para a atmosfera como resultado da queima de biomassa vegetal. Esse carbono, liberado principalmente na forma de gás carbônico, contribui para o aquecimento global através do efeito estufa. A qualidade do ar de algumas regiões da Amazônia também é fortemente modificada durante a época das queimadas. Essa qualidade pode atingir níveis piores do que aquele registrado para o ar do centro urbano da cidade de São Paulo. Atualmente as regiões do planeta com maior número de queimadas estão nos países em desenvolvimento dos trópicos e subtrópicos da África, América do Sul e Sudeste Asiático. Para estas áreas o sensoriamento remoto é a melhor ferramenta para quantificar e analisar a distribuição e extensão das queimadas e da fumaça.

O relatório especial do IPCC (Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima, BARKER *et al*, 2007) observa que a queima de biomassa transfere para a atmosfera uma grande proporção (até 90%) do carbono, na forma de CO_2, CO, CH_4 e material particulado. A proporção desses gases depende do tipo de material queimado e das condições da queima. As queimadas também provocam um aumento da temperatura do solo, aumentando o fluxo de CO_2 no solo (MCT, 2006). A fim de estimar as emissões de gases de efeito estufa, induzidas pelo homem, em decorrência da queima de biomassa é necessário, primeiramente, estimar a área queimada, identificar o tipo de vegetal afetado pelo incêndio e, finalmente, estimar as emissões associadas com os diferentes tipos. Obviamente, também é importante saber o quão completo é o processo de combustão (CARVALHO JR. *et al*, 1995).

Assim, se faz necessário o estudo da emissão de gases na atmosfera dada pela combustão de biomassa na região amazônica, bem como a influência destes gases no aumento do efeito estufa.

1.1 Objetivos

Os principais objetivos deste trabalho são:

a) Determinar os fatores de emissão dos principais gases emitidos na atmosfera pela combustão de biomassa em experimentos de campo na região amazônica.

b) Determinar os fatores de emissão dos principais gases emitidos na atmosfera pela combustão de biomassa de eucalipto em laboratório e identificar a influência de algumas variáveis como: diâmetro dos troncos de madeira, vazão de ar e inclinação da bandeja, na emissão destes gases.

1.2 Estrutura da tese

Esta tese de doutorado é constituída de 5 capítulos, referências bibliográficas e anexos.

O Capítulo 1, denominado de INTRODUÇÃO, apresenta os objetivos, a justificativa e a estrutura desta tese.

O Capítulo 2, intitulado de REVISÃO BIBLIOGRÁFICA, apresenta uma revisão de conceitos que foram utilizados neste trabalho, como por exemplo: efeito estufa, combustão, biomassa, cromatografia e fatores de emissão.

No Capítulo 3 é apresentada a METODOLOGIA experimental utilizada tanto em Cruzeiro do Sul (AC) quanto no laboratório do LCP/INPE.

No Capítulo 4, RESULTADOS E DISCUSSÕES, é efetuada a comparação entre os resultados de fatores médios de emissão obtidos em Alta Floresta (2004) e Cruzeiro do Sul (2010), bem como os fatores de emissão dos gases obtidos em laboratório, nas quais foram utilizadas duas técnicas para medir a concentração dos gases: cromatografia e analisadores de gases.

As CONCLUSÕES são apresentadas no Capítulo 5.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Efeito estufa

A atmosfera é constituída por vários gases. Os principais são: o nitrogênio (N_2) e o oxigênio (O_2) que, juntos, compõem cerca de 99% da atmosfera. Vários outros gases encontram-se presentes em pequenas quantidades e, constituem os conhecidos "gases de efeito estufa" como o dióxido de carbono (CO_2), ozônio (O_3), metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), os F-gases que são denominados os gases fluorados formados por hidrofluorcarbonos (HFCs), perfluorcarbonos (PFCs) e hexafluoreto de enxofre (SF_6), o clorofluorcarboneto (CFC), juntamente com o vapor d'água (H_2O).

O vapor d'água e o dióxido de carbono têm a propriedade de permitir que as ondas eletromagnéticas que chegam do sol atravessem a atmosfera e aqueçam a superfície terrestre. A energia solar de comprimento de onda muito curta ultrapassa a atmosfera terrestre sem interação com os gases presentes nesta camada. Ao atingir a superfície terrestre a energia é refletida e volta para a atmosfera com um comprimento de onda mais longo (radiação infravermelha) que interage parcialmente com os gases do efeito estufa presente nesta camada. Parte dessa irradiação é absorvida na atmosfera aumentando a temperatura do ar. Contudo, esta mesma camada dificulta a saída da radiação infravermelha emitida pela Terra, isso impede que ocorra uma perda demasiada de calor irradiado para o espaço, especialmente à noite, mantendo, assim, a Terra aquecida. Esse fenômeno natural, chamado de efeito estufa ocorre há milhões de anos e é necessário, pois sem ele a temperatura média da Terra seria 33 ºC mais baixa e a vida no planeta, tal como conhecemos, não seria possível (MITCHELL, 1989; XAVIER, 2004; BALCAZAR, 2011; CERRI e CERRI, 2007; MALER, 2003). A Figura 1 ilustra a formação do efeito estufa.

O vapor de água participa com 65% do efeito estufa, o CO_2 com 32% e os demais gases com apenas 3%. Portanto, o vapor de água é o principal gás estufa e o CO_2 é o segundo em importância, com uma contribuição que é a metade do primeiro (MITCHELL, 1989; XAVIER, 2004).

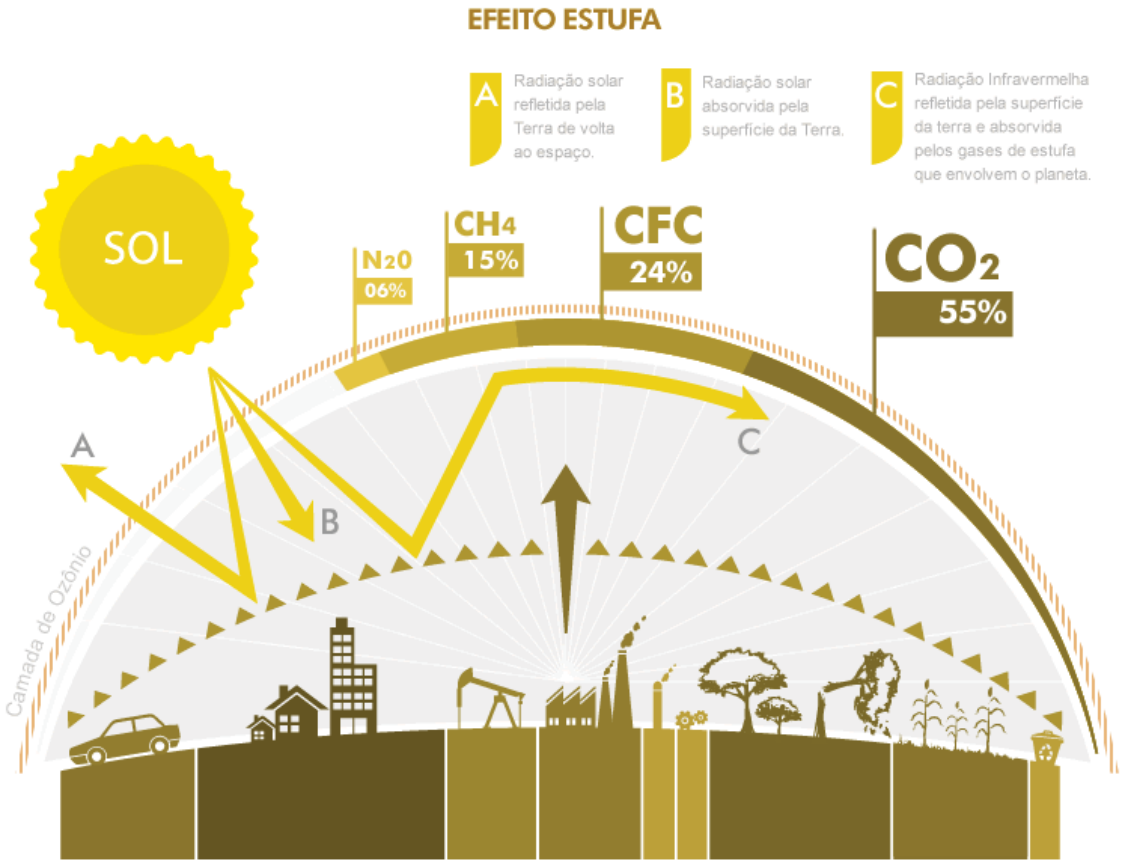


Figura 1- Formação do efeito estufa. (SUZANO, 2012)

O dióxido de carbono, metano e o óxido nitroso são os contribuintes gasosos da atmosfera que mais têm sido discutidos. No entanto, atenção prioritária tem sido dedicada ao dióxido de carbono, uma vez que o volume de suas emissões para a atmosfera representa algo em torno de 55% do total das emissões de gases de efeito estufa e seu tempo de permanência na atmosfera estende-se por pelo menos 10 décadas. Somando-se ao processo natural, as atividades antrópicas, estão resultando em contribuições adicionais de gases de efeito estufa, acentuando a concentração dos mesmos na atmosfera e, consequentemente, ampliando a capacidade de absorção de energia que naturalmente já possuem. Reservatórios naturais e sumidouros que têm a propriedade de absorver o CO_2 do ar são também afetados por ação antrópica, como as queimadas e os desmatamentos (MCT, 1999 e IPAM, 2002).

O aumento do efeito estufa é consequência do aumento da queima de combustíveis fósseis como os derivados do petróleo, gás natural e carvão mineral, para

a produção de energia que movimenta indústrias, automóveis, aparelhos domésticos e da derrubada e queimada de florestas (KIRCHHOFF, 1992).

Consequentemente os impactos da variação da concentração dos gases de efeito estufa não são imediatamente conhecidos, mas serão sentidos de alguma forma no futuro pois é o estoque destes gases na atmosfera que conduz o aquecimento global ao invés do fluxo das emissões (ARATANGY, 2007). A Figura 1 ilustra a formação do efeito estufa.

Na Figura 2 observam-se as emissões dos principais gases do efeito estufa de origem antropogênicas incluindo os F-gases (BARKER *et al*, 2007).

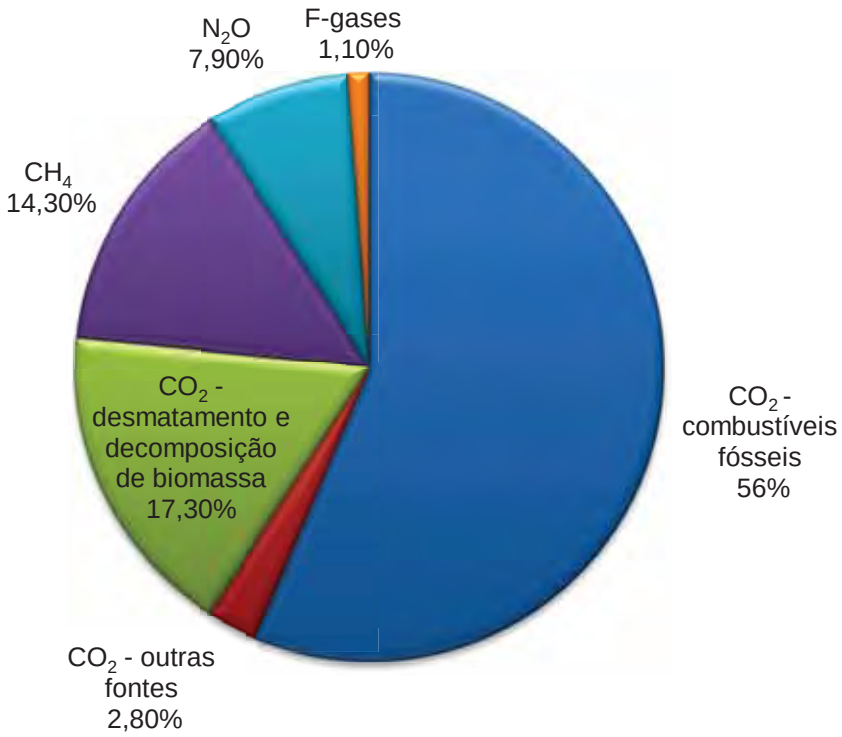


Figura 2 – Emissão dos gases do efeito estufa de origem antropogênica (BARKER *et al*, 2007)

Os principais gases responsáveis pelo aumento do efeito estufa são: dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O). Podem-se sintetizar na Tabela 1, as principais fontes destes gases (KRUPA, 1997 e CEEETA, 2002).

Tabela 1 – Fontes dos principais gases do efeito estufa

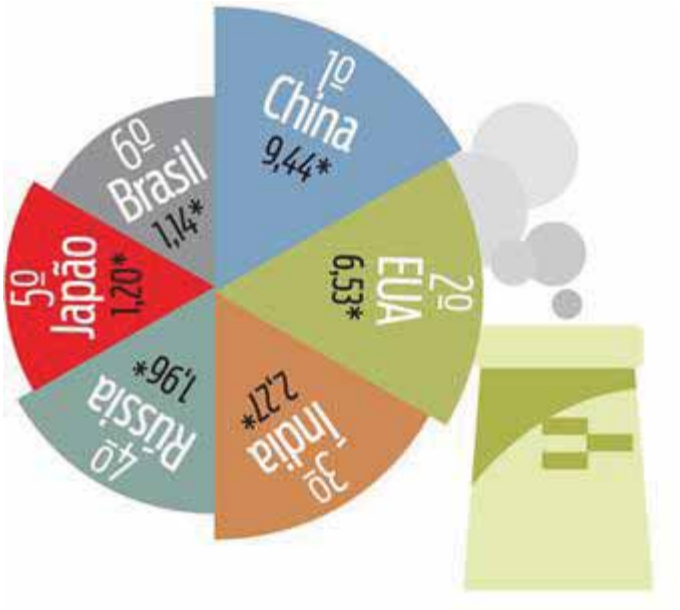
	CO_2	CH_4	N_2O
Fonte natural	Respiração; Decomposição de plantas e animais; Pelas queimadas naturais em florestas.	Matéria orgânica em decomposição.	Oceanos; Florestas tropicais.
Fonte antropogênica	Queima de combustíveis fósseis; Desmatamento; Fabricação de cimento.	Produção, armazenagem e queima de carvão mineral; Produção e transporte de gás natural; Produção de arroz.	Produção de nylon e ácido nítrico; Atividades agrícolas; Queima de biomassa e a queima de combustíveis fósseis.
Contribuição para o aumento do efeito estufa	60%	15%	5%
Tempo de vida na atmosfera	50 a 200 anos	10 anos	150 anos
Taxa anual de aumento	0,5%	0,9%	0,3%

Conforme pode ser observado o CO_2 contribui em 60% para o aumento do efeito estufa, sendo que as principais fontes deste gás são a queima de combustíveis fósseis e o desmatamento.

Pode-se constatar que o CO_2 proveniente da queima de combustível fóssil equivale a mais de 50% dos gases emitidos que causam aumento do efeito estufa.

A Figura 3 ilustra os principais países que emitem os gases do efeito estufa no ano base de 2010. CO_2 equivalente é uma medida métrica utilizada para comparar as emissões de vários GEE baseado no potencial de aquecimento global de cada um deles (IPAM, 2002).

.



* Valores em giga toneladas de CO_2 equivalente

Figura 3 - Ranking Internacional de Emissões de GEE (BARBOSA, 2011)

Como se observa no gráfico, a China e os EUA são os maiores responsáveis pelo aumento da emissão de gases do efeito estufa.

2.2 Combustão de biomassa

Qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica é classificada como biomassa. De acordo com a sua origem, pode ser: florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo), (ANEEL, 2002).

A madeira foi a primeira biomassa usada como fonte energética pelo homem, inicialmente empregada para aquecimento e cozimento de alimentos. Através dos tempos, a biomassa passou a ser utilizada como combustível sólido, líquido e gasoso em processos para a geração de energia térmica, mecânica e elétrica. Hoje ainda, continua participando da matriz energética mundial, com maior ou menor intensidade em cada país. Seu uso é afetado por variáveis como o nível de desenvolvimento do país, preço, disponibilidade e questões ambientais relacionadas às fontes energéticas

como petróleo, gás natural, hidroeletricidade, energia nuclear e outras (BRAND, 2007).

Para Carvalho (2007), combustão é caracterizada por uma reação exotérmica muito rápida entre combustível e oxidante, acompanhada por liberação de calor. O processo de combustão pode ser representado pela equação (1):

$$\text{Combustível} + \text{Oxidante} \rightarrow \text{Produtos} \quad (1)$$

Na qual combustível é uma substância química que em contato com um oxidante, pode produzir uma reação exotérmica, ou seja, libera energia na forma de calor (CARVALHO, 2007).

A madeira é um combustível sólido. Como tal, passa por processo de degradação térmica quando submetida à elevação da temperatura. Neste processo, diferentes resíduos são produzidos, entre eles: compostos químicos voláteis, gases, vapor d'água, fumaça, cinzas e carvão (PINTO, 2006).

A combustão da biomassa é considerada uma das principais fontes emissoras de gases poluentes da atmosfera terrestre (CRUTZEN e ANDREAE, 1990, CARVALHO *et al.,* 2010). De acordo com Ito e Penner (2004), aproximadamente 2290 TgC/ano são lançados na atmosfera provenientes da queima de biomassa, enquanto para Mieville *et al* (2010) a média anual da emissão de CO_2 emitido pela queima de biomassa foi de aproximadamente 2714 TgC/ano, no período de 1997 a 2005.

A combustão de biomassa se faz em três estágios: ignição, combustão com chama (*flaming*), e combustão com ausência de chama (incandescência ou *smoldering*) (JUNEJA, 1975 e ROWEL, 1991). A Figura 4 representa as três fases da combustão de biomassa.



Figura 4 – Fases da combustão de biomassa: ignição, chama e incandescência.

A combustão completa da madeira produz vapor d'água e CO_2 juntamente com calor e cinzas não combustíveis. Quando a combustão é incompleta ocorre à formação de CO, hidrocarbonetos e outros gases.

Na primeira fase da combustão há o aquecimento da madeira para a evaporação e eliminação da água. Na segunda fase de combustão a madeira começa a ser quimicamente degradada e materiais voláteis começam a ser vaporizados. O terceiro estágio de combustão é o da queima do carvão que permanece após a liberação dos gases voláteis. Finalmente, uma pequena quantidade de cinza permanece após a queima do carvão (BRITO, 1979).

Na Amazônia, utiliza-se a derrubada e a queima da floresta para a ampliação das fazendas visando à implantação de novas áreas agrícolas e de pastagens. No Brasil, uma média de 17000 km²/ano das florestas primárias são queimadas segundo Andreae e Merlet (2001). Entre 2000 e 2011, a taxa média de desmatamento na floresta Amazônica foi de 15815 km²/ano (INPE, 2012).

A utilização da biomassa como combustível tem suas vantagens, como (QUIRINO, 2005 e MARK, 2009):

- Possuir baixo custo de produção e de aquisição;
- Ser renovável;
- Permitir o reaproveitamento de resíduos;
- Possuir baixo teor de enxofre;
- Ser menos poluente do que outras formas de energias, como aquela que é obtida a partir de combustíveis fósseis (já que a emissão de CO_2 na atmosfera, geralmente é compensada pela absorção no plantio de uma nova biomassa); e

- A incineração de biomassa (lenha) é uma das fontes de energia doméstica nos países em desenvolvimento.

2.2.1 Cálculo do teor de umidade

O cálculo do teor de umidade é importante, pois além de ser um parâmetro para se calcular o fator de emissão, ele indica quanto de massa está sendo verdadeiramente queimada. A massa consumida deve ser corrigida para base seca, ou seja, deve ser descontada a umidade da biomassa, pois a água evapora durante a combustão e não participa do processo de combustão (OLIVEIRA, 2008). A queima da madeira úmida proporciona menos energia devido ao consumo no aquecimento e vaporização da água. Para que ocorra uma boa combustão, a madeira deve ser utilizada com teores de umidade abaixo de 25%. Teores superiores a 25%, além de diminuir a quantidade de calorias, reduzem as temperaturas da câmara de queima e dos gases de escape. Adicionalmente, promovem a formação de crostas de fuligem nas chaminés e interior da câmara de combustão (PEREIRA, 2000). A quantidade máxima de água que a madeira pode ter para entrar em combustão tem sido calculada em aproximadamente 65% na base úmida (o resto corresponde ao material sólido). Desta forma, madeira muito úmida, com teor de umidade acima deste limite, necessita de calorias de origem externa para secar e entrar em combustão. Desta forma, madeira muito úmida, com teor de umidade acima deste limite, necessita de energia de origem externa para secar e entrar em combustão, segundo Quirino (2005). Valores altos para a umidade relativa podem alterar a velocidade e a intensidade da queima.

O cálculo da umidade relativa se dá pela equação (2):

$$W\% = \frac{M_i - M_s}{M_i} \text{ x} 100 \qquad (2)$$

Sendo: W% - teor de umidade em base seca da amostra de madeira

M_i – massa inicial

M_s – massa seca

2.2.2 Fator de emissão

Fator de emissão significa a quantidade de massa emitida de um gás quando é consumido um quilograma de biomassa seca na combustão, ou seja, é um indicador de poluição que exprime a relação entre a quantidade de poluição produzida e a quantidade de matéria processada. Esse fator é expresso como a razão entre o peso do poluente e uma unidade de peso ou volume, por exemplo, kg de partículas emitidas por megagrama de carvão queimado (EHSO, 2011 e LEXTEC, 2012).

Sabe-se que para cada grama de carbono emitida pelos gases de combustão, dois gramas de biomassa são consumidos. Admitindo-se que a composição química média da madeira é de 50% de carbono, 6% de hidrogênio e 44% de oxigênio (ANDRADE, 1939). Com esta relação pode-se calcular o fator de emissão para todos os gases.

O fator de emissão (FE_X) para uma espécie química em g/kg (gramas da espécie X por kg de biomassa seca queimada) foi calculada de acordo com a equação (3):

$$FE_X = \frac{V_{total\text{-}chaminé}}{m_{(combustível\ em\ base\ seca)}} \frac{[]_X \cdot M_X}{V_X} \left[\frac{g_X}{kg_{(combustível\ em\ base\ seca)}} \right] \qquad (3)$$

Em que:

$V_{total\ -\ chaminé}$ = volume total de gases que flui pela chaminé (m^3)

$[]_X$ = concentração média de X (ppmv)

M_X = massa molar (g/mol)

$m_{(combustível\ em\ base\ seca)}$ = massa do combustível em base seca (kg)

V_x = volume molar de 1 mol a 0 °C e 1 atm (L/mol)

A Tabela 2 apresenta um extenso conjunto de valores para os fatores de emissão dos principais gases gerados na queima de biomassa, publicados na literatura e obtidos em experimento de campo na região Amazônica (SOARES NETO *et al.*, 2011).

Tabela 2 – Fatores de emissão em experimentos de campo (SOARES NETO *et al.*, 2011)

CO_2 (g/kg)	CO (g/kg)	CH_4 (g/kg)	Tipo de medição	Referências
1690	63	3,4	Chão, chama	Soares Neto *et al* (2009) *canisters*[a]
1625	101	7,3	Chão, intermediário	Soares Neto *et al* (2009) *canisters*[a]
1540	141	13,1	Chão, incandescência	Soares Neto *et al* (2009) *canisters*[a]
1741	59	-	Chão, chama	Soares Neto *et al* (2009) tempo real[b]
1631	129	-	Chão, intermediário	Soares Neto *et al* (2009) tempo real[b]
1548	181	-	Chão, incandescência	Soares Neto *et al* (2009) tempo real[b]
1615±40	101±24	5,7±1,4	Ar	Yokelson *et al* (2007)
-	61	-	Ar	Guyon *et al* (2005)
1664±9,6	95,2±5,3	5,5±0,4	Chão, chama	Guild *et al* (2004)
1530±4,9	169,2±2,8	11,9±0,2	Chão, incandescência	Guild *et al* (2004)
1580±90	104±20	6,8±2	Revisão	Andreae and Merlet (2001)
1674	70	5,3	Ar, chama	Ferek *et al* (1998)
1524	140	8,3	Ar, incandescência	Ferek *et al* (1998)
1649	86	5,1	Ar, média	Babbitt *et al* (1996)
1671	85	5,0	Chão, chama	Babbitt *et al* (1996)
1562	140	9,8	Chão, intermediário	Babbitt *et al* (1996)
1515	168	11,8	Chão, incandescência	Babbitt *et al*. (1996)
1666	98	4,9	Ar, média	Kaufman *et al* (1992)
1741	47	2,5	Ar, média	Kaufman *et al* (1992)
1586	121	7,2	Ar, média	Kaufman *et al* (1992)
1612	112	7,1	Chão, chama	Ward *et al* (1992)
1551	142	9,0	Chão, incandescência	Ward *et al* (1992)
1531	152	10,8	Chão, incandescência	Ward *et al* (1992)
1692	73	4,3	Chão, chama	Ward *et al* (1992)[c]
1652	91	4,8	Chão, incandescência	Ward *et al* (1992)[c]
1637	94	4,9	Chão, chama	Ward *et al* (1992)[c]
1625	107	5,2	Chão, incandescência	Ward *et al* (1992)[c]

[a] Gases coletados em garrafas (*canisters*) e analisados posteriormente

[b] Gases analisados *in loco.*

[c] Floresta secundária.

2.2.3 Quantidade de carbono associado a cada gás

A quantidade de carbono emitido associado a cada gás é calculado empregando a equação dos gases ideais e admitindo-se que os gases se encontram à temperatura de 25 °C e 1 atm. A equação 4 apresenta a equação para o cálculo de carbono emitido associado ao CO_2, para outros gases é feito de maneira análoga.

$$C\text{-}CO_2 = \frac{[CO2] \text{ x } M_{CO2} \text{ x } 10^3 mg \text{ x } 12gC}{V_{CO2} \text{ x } 10^{-3} m^3 \text{ x } 44gCO2} \quad (4)$$

Na qual: $[CO_2]$ é a concentração de CO_2 em ppm

M_{CO2} é a massa molecular do CO_2 que é igual a 44 g

V_{CO2} é o volume igual a 24,5 l para um mol de CO_2 nas condições apresentadas.

2.2.4 Eficiência de Combustão e Eficiência de Combustão Modificada

Segundo Ward e Hardy (1991), a eficiência de combustão (EC) é calculada partindo-se do princípio de que a combustão completa de 1 kg de biomassa contendo 50% de carbono pode produzir no máximo 1820 g de CO_2. Define-se como a razão do carbono emitido como CO_2 e o carbono total emitido na forma de CO_2, CO, NMHC (hidrocarboneto não metano) e $MP_{2,5}$ (material particulado com diâmetro menor que 2,5 μm). Já a eficiência de combustão modificada (ECM) é obtida pela razão entre a concentração do carbono emitido como CO_2 e a concentração do carbono emitido como CO_2 + CO. Dados da literatura reportam que valores de EC maiores que 0,9 caracterizam a combustão de biomassa na fase de chama, enquanto valores de EC compreendidos entre 0,75 e 0,85 caracterizam a fase de incandescência (BABBITT *et al*, 1996). Assim a eficiência de combustão (EC) e a eficiência de combustão modificada (ECM) podem ser calculadas pelas equações 5 e 6.

$$EC = \frac{[CO_2]}{[C_{total}]} \quad (5)$$

$$ECM = \frac{[CO_2]}{[CO_2]+[CO]} \quad (6)$$

Em que:

EC – Eficiência de combustão

ECM - Eficiência de combustão modificada

$[CO_2]$ – Concentração do carbono emitido como CO_2

[CO] – Concentração do carbono emitido como CO

$[C_{total}]$ - Concentração do carbono total emitido

2.3 Cromatografia gasosa

Segundo Linde (2008), a cromatografia é um método físico de separação, no qual os componentes a serem separados são distribuídos entre duas fases: a fase estacionária e a fase móvel. A fase estacionária é formada de um material escolhido para reter de forma distinta os componentes da amostra que se deseja separar. A fase móvel é o material que se desloca pela fase estacionária, arrastando os componentes da amostra.

O método consiste primeiramente na introdução da amostra através de um injetor em uma corrente de gás inerte, normalmente hidrogênio, hélio, nitrogênio ou argônio, que atuarão como gás de arraste (no presente trabalho utilizou-se o hélio). O fluxo de gás passa pela coluna que pode ser empacotada ou capilar, através da qual os componentes da amostra se deslocam a velocidades influenciadas pelo grau de interação de cada componente com a fase estacionária não volátil. As substâncias que têm a maior interação com a fase estacionária são retidas por mais tempo e, portanto, separadas daquelas de menor interação, (LINDE, 2008). Estas etapas podem ser visualizadas nas figuras 5 e 6.

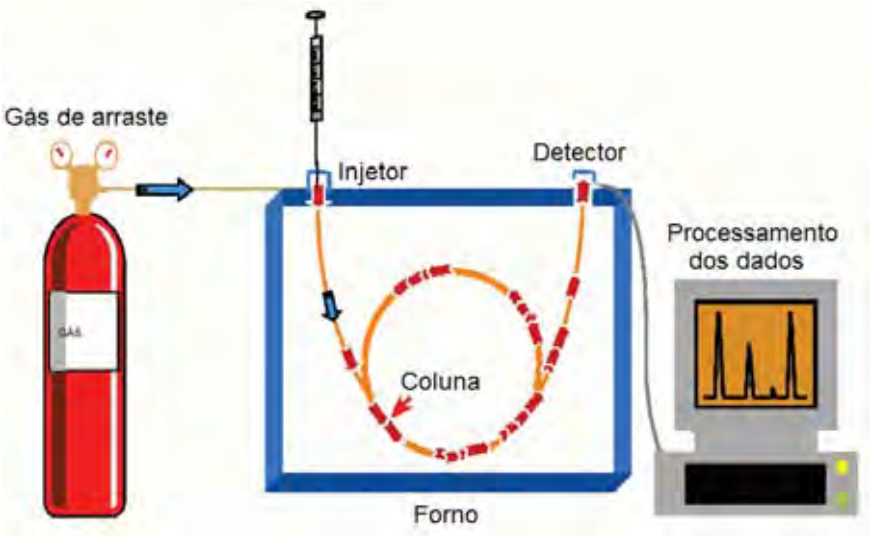


Figura 5 – Esquema de um cromatógrafo (DEL GRANDE, 2012)

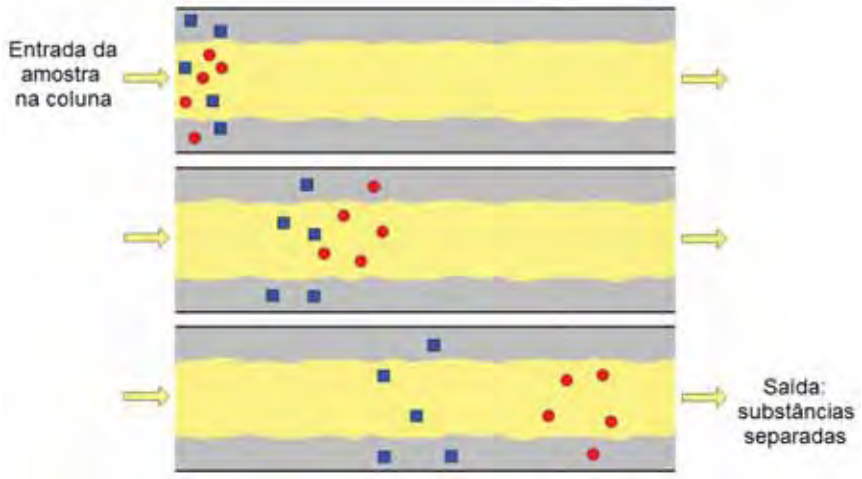


Figura 6 – Detalhe da retenção dos gases no interior da coluna (DEL GRANDE, 2012)

Na figura 6, observa-se que a “substância azul”, possui maior interação com a fase estacionária e por isso fica retida por mais tempo, separando-se assim da “substância vermelha”, que é a primeira substância a sair da coluna.

Após a saída da coluna, as substâncias separadas passam e são quantificadas por um detector. Um detector de ionização de chama (FID - *Flame Ionization Detector*) consiste em uma chama de hidrogênio H_2/ar e um prato coletor, ilustrado pela figura 7. A amostra sofre combustão (mantida pela chama de hidrogênio e ar) e é então

ionizada. A quantidade de íons formada é detectada pelo FID e a concentração de cada gás é diretamente proporcional ao número de íons formados (ALVES, 1998). O FID é bastante sensível e com uma faixa dinâmica grande, sendo que sua única desvantagem é que destrói a amostra (LINDE, 2008).

Os detectores por ionização de chama são usados para detectar hidrocarbonetos, como o metano (CH_4), etano (C_2H_6) e acetileno (C_2H_2). Para a análise do CO_2 e o CO que são gases provenientes de combustão de biomassa, o cromatógrafo utilizado possui um metanizador instalado antes do detector que transforma esses gases em CH_4 para posterior quantificação.

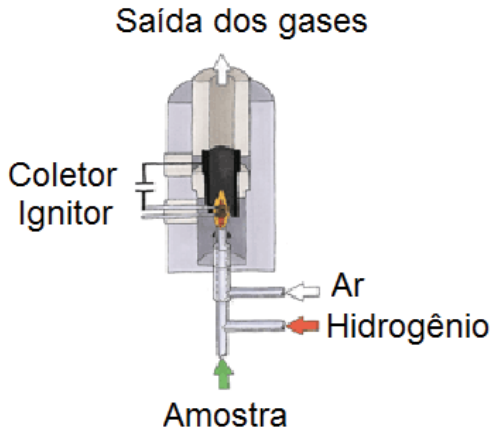


Figura 7 – Esquema do FID (LINDE, 2008)

O FID oferece uma leitura rápida, precisa e contínua da concentração total de HC para níveis tão baixos como ppm.

2.4 Planejamento de experimentos

Um experimento planejado é uma série de testes nos quais as variáveis de entrada (*inputs*) do processo são modificadas de tal maneira que seja possível analisar os efeitos nas variáveis de saída ou resposta (*outputs*). A Figura 8 ilustra o modelo do processo utilizado neste trabalho.



Figura 8 – Modelo do processo utilizado, baseado no modelo de Montgomery (1991) e Galdamez (2002)

Tem-se que as variáveis de entrada a serem estudadas são: diâmetro do troco, inclinação da bandeja de queima e vazão de ar, o processo é a combustão de eucalipto e a variável resposta a emissão de gases provenientes da queima, inclusive os que contribuem para o aumento do efeito estufa.

2.4.1 Planejamento fatorial 2^3

Um experimento fatorial 2^3 é um experimento com 3 fatores em 2 níveis. O processo experimental dessa técnica consiste em realizar teste com cada uma das combinações de uma matriz experimental para em seguida calcular e interpretar os efeitos principais e interações dos fatores e assim identificar as melhores condições experimentais de acordo com o propósito estudado (GÁLDAMEZ, 2002 e TEOFILO, 2006).

Em geral, uma combinação de tratamentos é representada por uma série de letras minúsculas. Montgomery (2004) ressalta que, se uma letra estiver presente, então o fator correspondente é testado no nível alto naquela combinação; se estiver ausente, o fator correspondente é testado no nível baixo. De acordo com a codificação, o tratamento em que todos os fatores estão no nível mais baixo deve ser representado pelo símbolo (1). As letras minúsculas *a*, *b*, *ab*, *c*, *ac*, *bc* e *abc* e o (1), também representam o total de todas as *n* réplicas em cada uma dos oito experimentos no planejamento.

O método generalizado pode ser utilizado para estimar os efeitos principais e de interação entre os fatores. Os efeitos principais correspondem à mudança da resposta média quando um nível de um fator é alterado de -1 para +1, mantendo-se os outros fatores constantes (VASCONCELOS, 2004). Na tabela 3, (1) representa o experimento realizado com as três variáveis (A, B e C) no nível baixo; *a* representa o experimento realizado com a variável A no nível superior e as demais no nível inferior; *b* representa o experimento realizado com a variável B no nível superior e as demais no nível inferior; *ab* representa o experimento realizado com as variáveis A e B no nível superior e a variável C no nível inferior e assim por diante.

Tabela 3 – Sinais para o cálculo dos efeitos e interações num planejamento fatorial 2^3 (MONTGOMERY, 2004)

	Efeito Fatorial						
Tratamento	A	B	C	AB	AC	BC	ABC
(1)	-1	-1	-1	+1	+1	+1	-1
a	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1
b	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1
ab	+1	+1	-1	+1	-1	-1	-1
c	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1
ac	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1
bc	-1	+1	+1	-1	-1	+1	-1
abc	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1

Tem-se então que analisar o efeito dos três fatores e de suas interações de 2ª e 3ª ordem descritos na tabela 4.

Tabela 4 – Efeito dos fatores (SILVA, 2007)

Efeitos principais	Interações de 2ª ordem	Interações de 3ª ordem
A	AB	ABC
B	AC	
C	BC	

O cálculo dos efeitos de cada fator pode ser estimado calculando a média das quatro combinações quando o fator A estiver no nível alto subtraindo a média das quatro combinações deste fator quando estiver no nível baixo.

Assim os efeitos principais A, B e C podem ser calculados segundo Montgomery (2004) pelas equações 7 a 9:

$$\mathrm{A} = \frac{1}{4}(a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc) \quad (7)$$

$$\mathrm{B} = \frac{1}{4}(b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac) \quad (8)$$

$$\mathrm{C} = \frac{1}{4}(c + bc + ac + abc - (1) - a - b - ab) \quad (9)$$

O cálculo das interações de 2ª e 3ª ordem pode ser calculado pelas equações de 10 a 13:

$$\mathrm{AB} = \frac{1}{4}(\, abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)) \quad (10)$$

$$\mathrm{AC} = \frac{1}{4}(\, abc - bc - ab + b + ac - c - a + (1)) \quad (11)$$

$$\mathrm{BC} = \frac{1}{4}(\, abc + bc - ab - b - ac - c + a + (1)) \quad (12)$$

$$\mathrm{ABC} = \frac{1}{4}(\, abc - bc - ab + b - ac + c + a - (1)) \quad (13)$$

2.5 Informações sobre o experimento realizado em Alta Floresta

Os dados obtidos com o experimento realizado em campo na cidade de Cruzeiro do Sul, AC serão comparados com os dados obtidos em Alta Floresta. As informações deste subcapítulo foram extraídas de Soares Neto *et al.* (2009). Este experimento foi realizado na fazenda Caiabi, próximo à cidade de Alta Floresta, MT. Alta Floresta esta localizada no arco de desmatamento Amazônico, como pode ser visto na figura 9.

Esta região é caracterizada por um longo e bem definido período de seca compreendido de junho até a primeira metade setembro, o que facilita a execução de queimadas no campo. A vegetação em uma área de 200 x 200 m^2 foi derrubada durante junho e queimada três meses depois, em 5 de setembro de 2004. O hectare central da área foi dividido em 100 quadrados de 10 m^2 cada. Realizou-se um inventário florestal antes da derrubada da vegetação, o número de espécies de plantas com um diâmetro à altura do peito (DAP) maiores que 10 cm era de aproximadamente 552 por hectare.

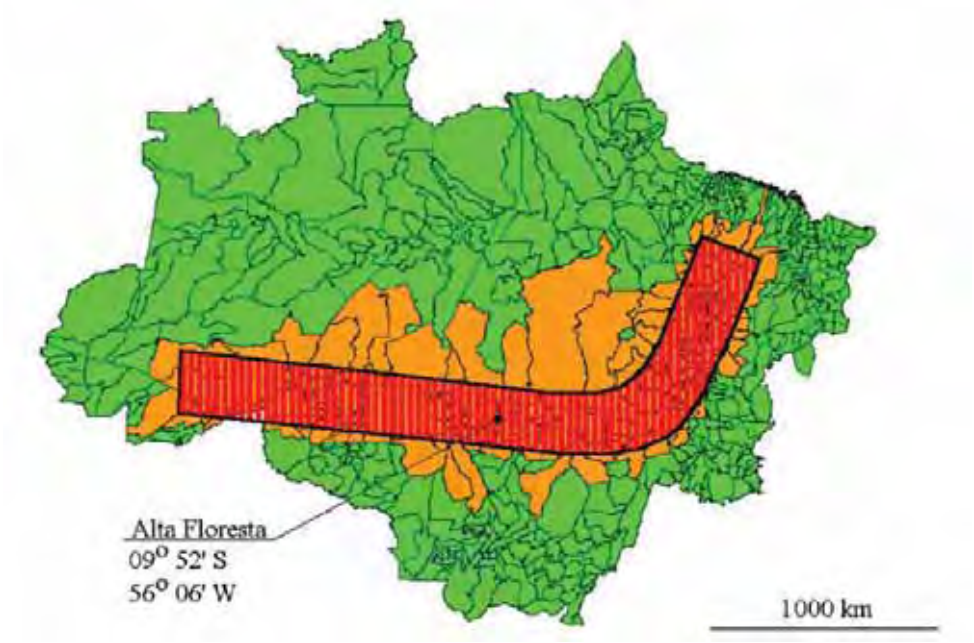


Figura 9 – Arco de desmatamento na região Amazônica e a localização de Alta Floresta

Obteve-se o consumo de liteira e de troncos com DAP menores que 10 cm pesando a biomassa, antes e depois da queima em 12 quadrados previamente determinados. A pesagem foi realizada no local com uma balança portátil com precisão de 0,01 kg. Estimou-se um total de 528 t/ha de biomassa úmida.

Troncos e galhos maiores (DAP > 10 cm) foram considerados como materiais de médio e grande porte. O consumo destas categorias foi estimado utilizando o procedimento de Sandberg e Ottmar (1983) descrito por Soares Neto *et al.* (2009).

Durante a queimada amostras de gás foram coletada com o sistema FASS (*Fire Atmosphere Sampling System*) que foi instalado no centro da área de ensaio no topo do

uma torre de 15 m, a uma taxa de 1,8 L/min. As amostras foram coletadas em função da fase do fogo sendo: 15 min para a fase chama, 15 min para a fase intermediária e 30 min para a fase de incandescência.

As amostras de gases foram analisadas por cromatografia gasosa na qual obteve os seguintes fatores de emissão: 1599 g/kg de CO_2, 111,3 g/kg de CO, 9,2 g/kg de CH_4, 5,6 g/kg de NMHC e 4,8 g/kg de $MP_{2,5}$ (em biomassa seca).

Soares Neto *et al.* (2009) também estimou que um hectare de floresta queimada emitiu cerca de 117000 kg de CO_2, 8100 kg de CO, 675 kg de CH_4, 407 kg de NMHC e 354 kg de $MP_{2,5}$.

3. METODOLOGIA

3.1 Amostragem dos gases em Cruzeiro do Sul, Acre

Este experimento foi realizado no dia 09 de setembro de 2010, com a finalidade de simular uma queimada real da Floresta Amazônica para estimar as emissões dos principais gases da combustão de sua biomassa. Foi utilizada uma área delimitada de 4 ha de floresta, sendo as árvores cortadas com antecedência de 3 meses para a secagem da biomassa e posterior realização da queima. A Figura 10 apresenta um esquema da região onde foi realizado o experimento, bem como a localização das duas torres de coleta de dados e materiais.

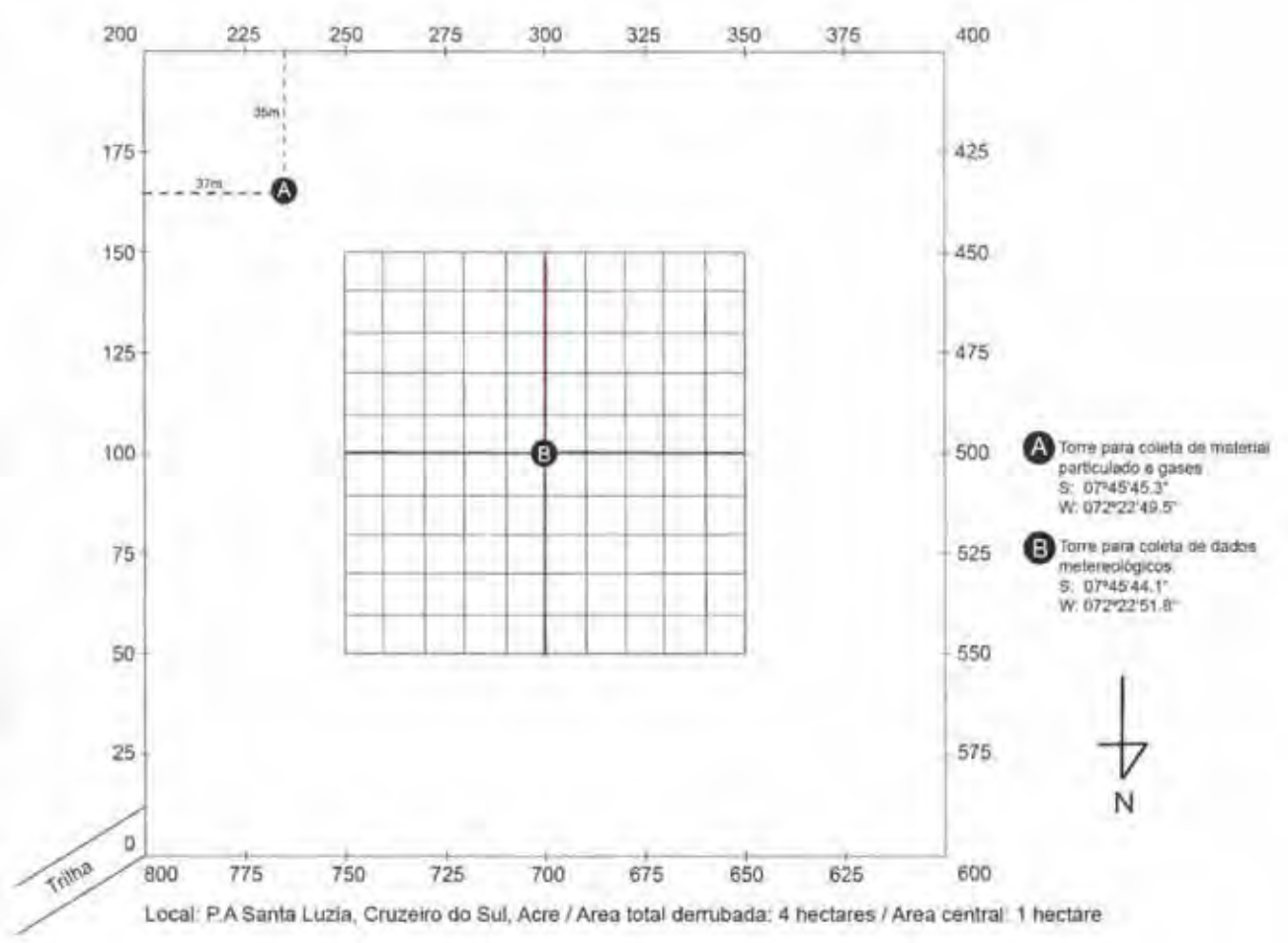


Figura 10 – Esquema da área de realização da queimada em Cruzeiro do Sul/AC

Para a coleta dos produtos da combustão foi utilizada uma torre de 13 m, na qual foi instalado um conjunto de sondas, filtros e um *manifold* com 4 eletroválvulas. Este conjunto pode ser visto com mais detalhes nas figuras de 11 a 14.



Figura 11 – Torre e instalação dos equipamentos no ponto A

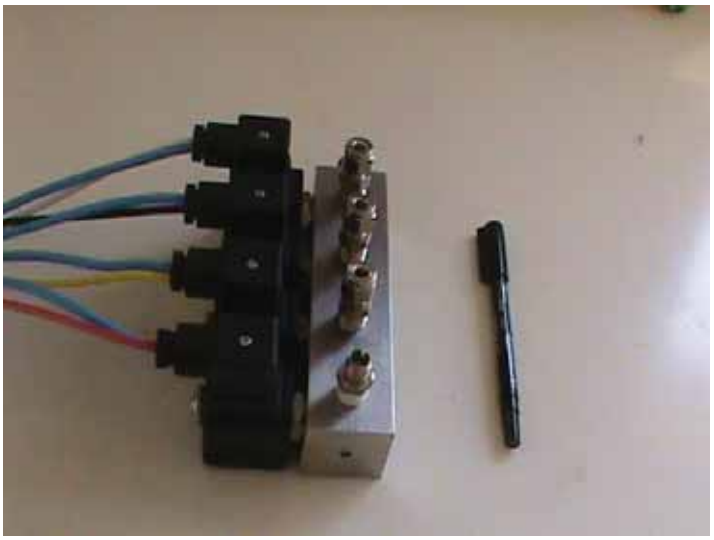


Figura 12 - *Manifold* e eletroválvulas



Figura 13 - Filtro para retenção do material particulado



Figura 14 - Caixa de abrigo instalada no topo da torre a 100 m da mesa de comando: *manifold*, eletroválvulas, filtros e pré-filtros para retenção de materiais particulados

A partir do *manifold* instalou-se um tubo de PFA (*Perfluoroalkoxy* - polímero com alto ponto de fusão) com 100 m de comprimento para condução dos gases até o sistema de coleta localizado dentro da floresta e a fiação elétrica, ambos com

isolamento térmico. Todo este sistema foi enterrado para não sofrer influência do fogo e da temperatura. Essa etapa pode ser observada nas figuras 15 e 16.



Figura 15 – Passagem da fiação elétrica e tubulação de gás



Figura 16 – Tubulação e fiação elétrica enterradas

O sistema de coleta foi constituído por dois filtros, uma válvula de pressão (*back pressure*), um controlador de vazão, uma bomba de vácuo e pressurização e um engate rápido para o encaixe das garrafas usadas para armazenamento das amostras nas diferentes fases de combustão. Esse sistema permitiu uma amostragem constante de cada fase, a uma determinada vazão (400 ml/min) e pressão (1,5 atm), reguladas simultaneamente pelo controlador de vazão e pela válvula de pressão. Todo o sistema de coleta foi alimentado por um gerador. O esquema deste sistema de coleta, a mesa de comando pronta e sua utilização no campo, podem ser visualizados nas figuras 17 a 19.

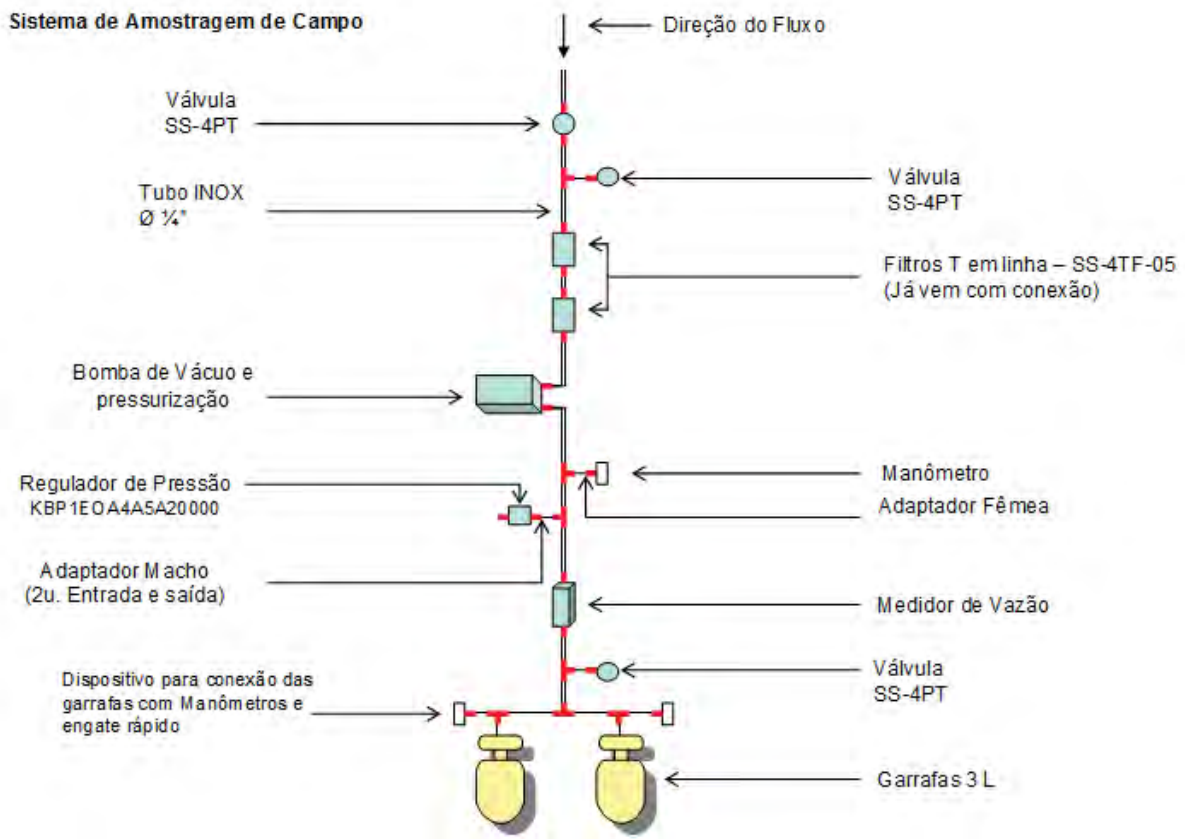


Figura 17 - Esquema da disposição dos componentes do sistema de amostragem de gases na mesa de comando.



Figura 18 - Mesa de comando do sistema de amostragem de gases montada e fixada em placa de acrílico.



Figura 19 – Instalação da mesa de comando no campo

Segundo o DPI (2010) foram registrados no dia da queima (09/09/2010) 15864 focos de queimadas em todo o território brasileiro, dos quais 50 no estado do Acre. Porém, o foco em estudo não foi detectado pelos satélites em operação, devido a grande presença de nuvens no local. As figuras de 20 a 22 abaixo ilustram os focos detectados pelos satélites.

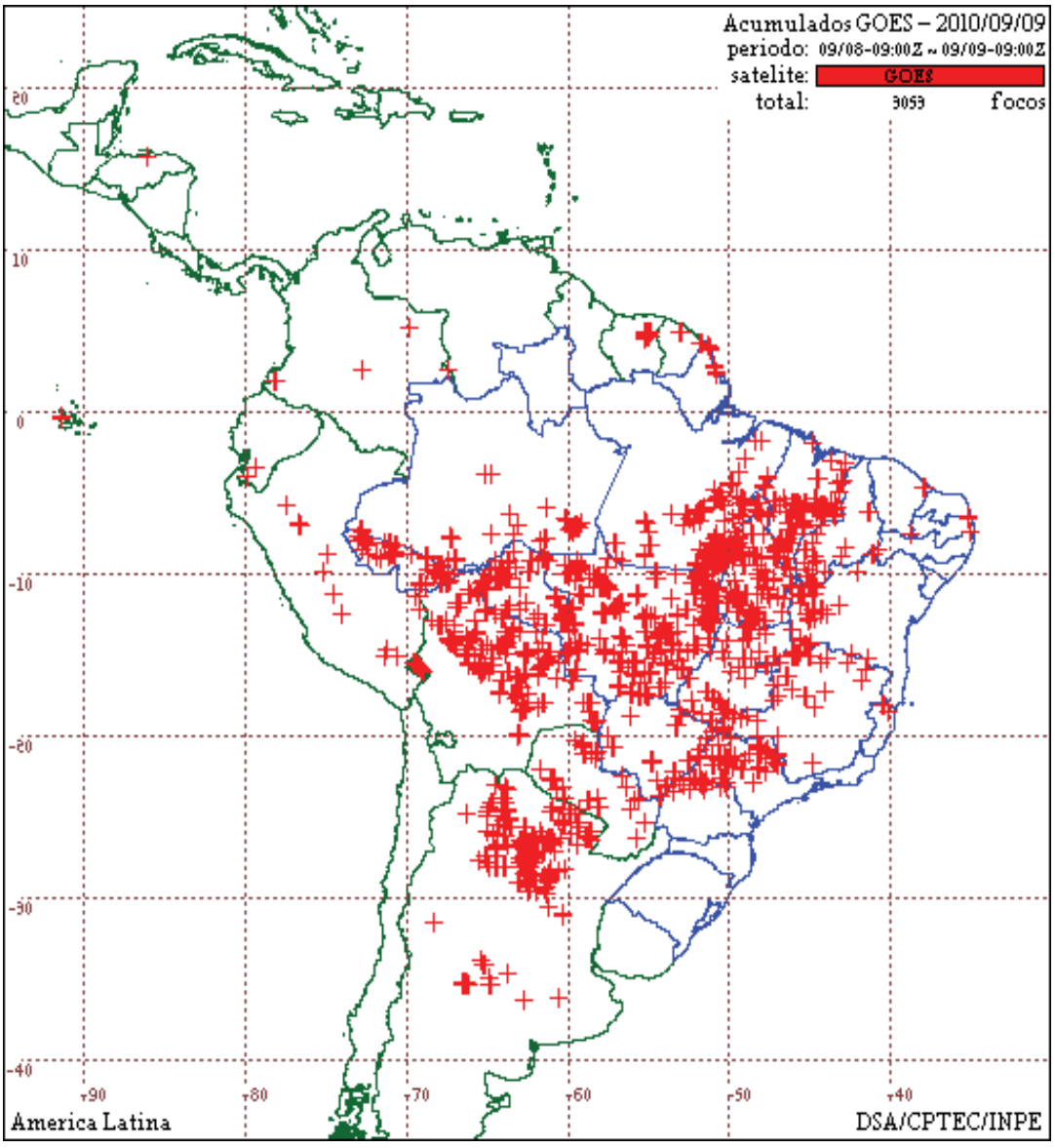


Figura 20 – Focos de incêndio registrados por satélites (Fonte: CPTEC – INPE)

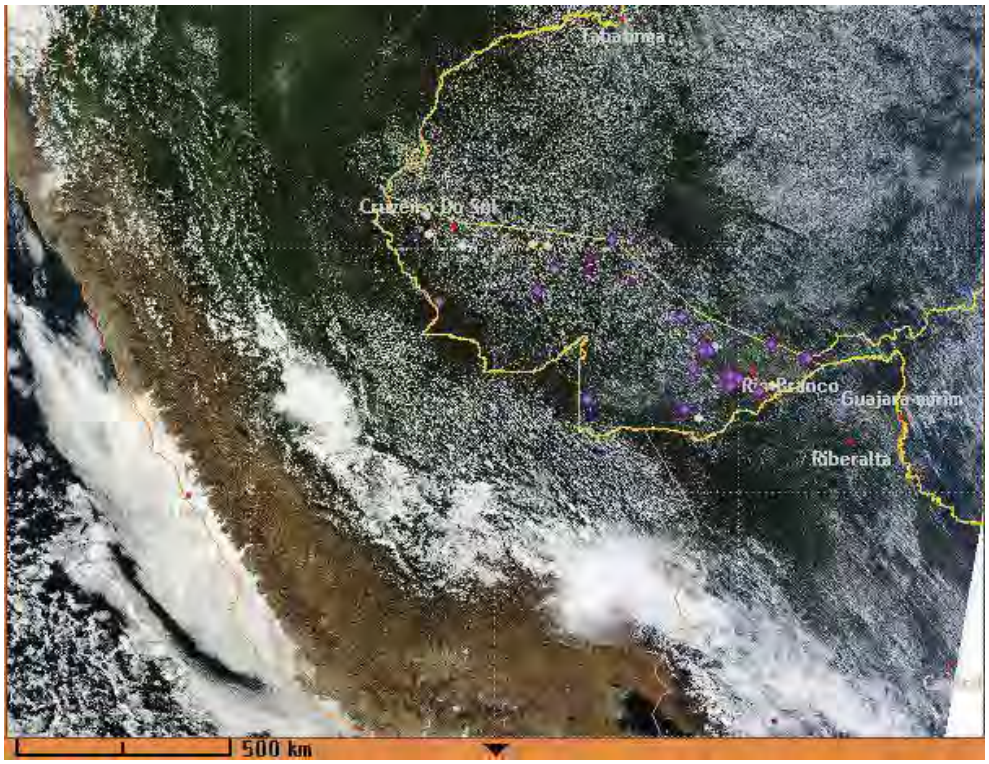


Figura 21 – 50 focos de incêndio registrados no estado do Acre no dia 09/09/2010 (DPI, 2010)

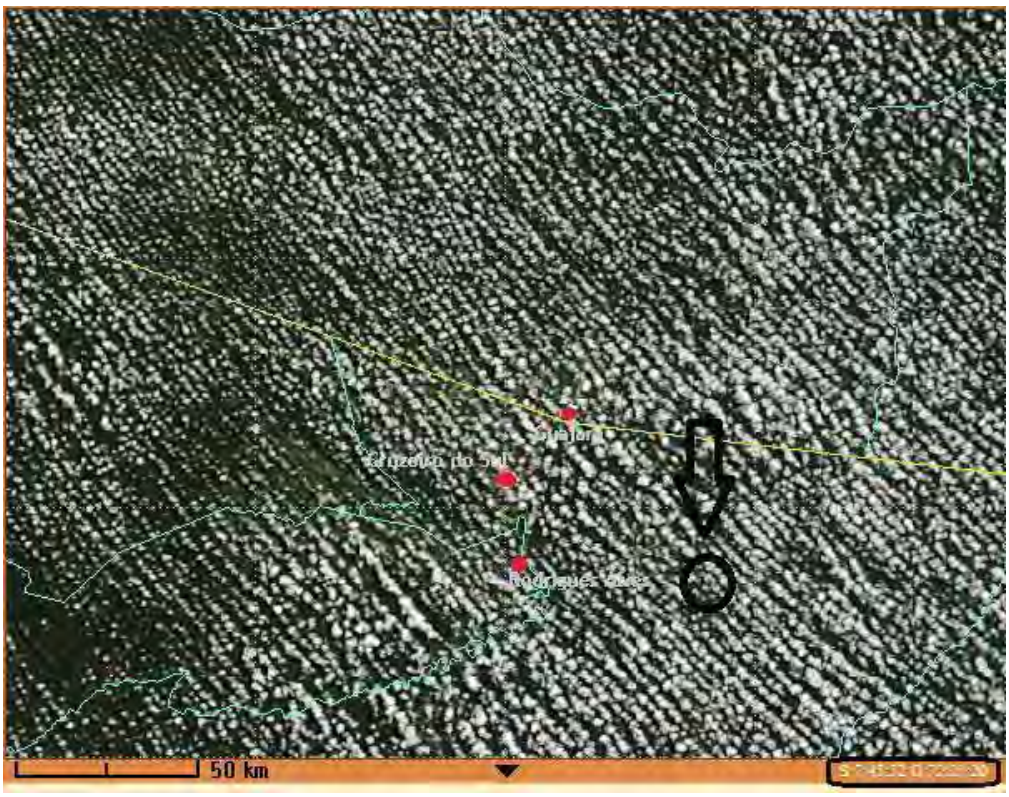


Figura 22 – Localização do experimento – foco não detectado pelos satélites (DPI, 2010)

Uma amostra de ar, denominada de *background* (BG), começou a ser coletada, antes do início da queimada, às 12 h 52 min.

O incêndio teve início às 14 h 42 min. Purgou-se o sistema por 15 min 12 s ligando a bomba a uma vazão de 1,5 l/min. A figura 23 ilustra o a preparação para o início do fogo.



Figura 23 – Preparação para o início do incêndio

A aquisição da 1ª amostra passando pelo filtro 1 ocorreu após 18 min 12 s do início da queimada, quando a fumaça que chegava ao sistema ainda não estava muito concentrada.

A aquisição da 2ª amostra passando pelo filtro 2 ocorreu após 41 min 16 s do início, quando a chama encontrava-se forte e próxima ao sistema de coleta.

A aquisição da 3ª amostra passando pelo filtro 4 ocorreu após 1 h 4 min 50 s, quando a chama estava de forte para fraca caracterizando a incandescência.

Foram obtidas mais 4 amostras até às 17 h 45 min, com um tempo médio de 23 min para o enchimento de cada garrafa, totalizando sete amostras de gases e uma referente ao *background* para posterior análise.

Os filtros de 1 a 4 foram utilizados para a retenção do material particulado até 2,5 µm, sendo o filtro 3 utilizado para quantificar os material particulado no *background*.

A série de figuras a seguir (figuras 24 a 31) ilustra as fases da queimada controlada.



Figura 24 – Área a ser queimada



Figura 25 – Início do fogo.



Figura 26 – Frente da linha do fogo



Figura 27 – Fase chama



Figura 28 – Labareda de fogo e pluma de fumaça



Figura 29 – Emissão de material particulado



Figura 30 – Fase de incandescência



Figura 31 – Fim da queima controlada

Nota-se nas figuras anteriores uma labareda de fogo muito alta, uma grande emissão de material particulado, bem como a total queima da liteira.

3.2 Amostragem dos gases em laboratório

Os experimentos em laboratório foram realizados com o intuito de comparar os resultados obtidos em campo, nas cidades de Alta Floresta em 2004 e em Cruzeiro do Sul (presente trabalho) com possíveis simulações em laboratório nas quais a escala, a devastação e a poluição seriam menores; também foram realizados para analisar qual fator mais influenciaria na emissão de gases poluentes. Tais experimentos foram realizados nas dependências do Laboratório Associado de Combustão e Propulsão (LCP) do INPE, em Cachoeira Paulista/SP.

Em cada teste as amostras de biomassa são dispostas em uma bandeja medindo 1 m^2 localizada no interior de um *container*. Essa bandeja é apoiada sobre uma balança para registro da perda de massa durante a queima, e sua inclinação pode variar de 0º a 45º em relação ao plano horizontal. Sobre a bandeja encontra-se uma coifa unida a uma chaminé. Nesta chaminé estão posicionados sensores de temperatura, sondas para coleta de gases e sensores de pressão diferencial e absoluta. Para garantir o fluxo de ar através da chaminé é utilizado um exaustor axial instalado no interior da chaminé em uma posição acima do ponto de tomadas de medidas. Esta estrutura experimental foi baseada nas características do experimento de Lobert *et al* (1991). A figura 32 ilustra este *container* e a figura 33 apresenta suas dimensões.



Figura 32 – Visão do *container* (OLIVEIRA, 2008)

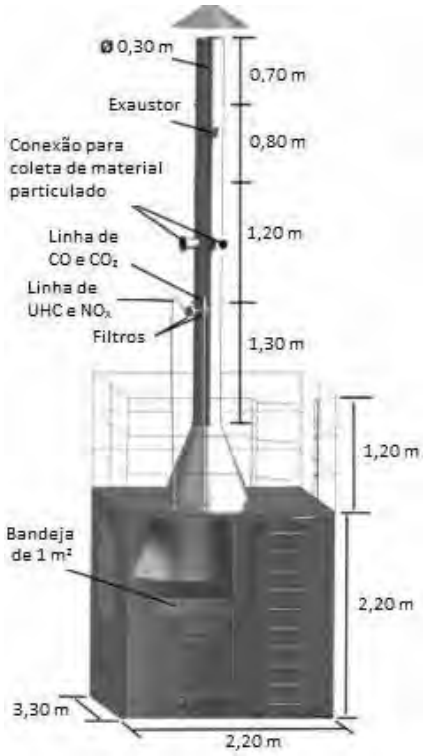


Figura 33 - Dimensões do *container* (SOARES NETO *et al.*, 2011)

A figura 34 ilustra o interior do *container*, onde se observa a bandeja, a balança e a coifa de exaustão.



Figura 34 – Balança, bandeja inclinável e coifa (OLIVEIRA, 2008)

Todos os dados experimentais são registrados, através de um sistema de aquisição de dados, em um microcomputador no qual são observadas as seguintes variáveis:

- Emissão de CO, CO_2, NO_x e UHC;
- Tempo de duração das fases da queima (chama e incandescência);
- Perda de massa durante as fases da queima;
- Vazão dos gases na chaminé;
- Temperatura dos gases na chaminé e próximo à chama

A temperatura dos gases é obtida através de termopar do tipo K, que tem boa precisão na faixa de 100 a 1200 ºC, intervalo no qual estão incluídas as temperaturas dos experimentos.

A vazão dos gases na chaminé pode ser controlada pelo controlador de rotação do exaustor, instalado no interior do *container* e ilustrado na figura 35.



Figura 35- Controlador de rotação do exaustor localizado no interior do *container*

Para a coleta dos gases emitidos durante a combustão utilizam-se sondas instaladas no interior da chaminé. Uma das sondas coleta amostras de gases para análise das concentrações de NO_X. Duas sondas coletam amostras para a análise das concentrações de CO_2 e CO. A figura 36 ilustra o posicionamento das sondas, do tubo de Pitot e do termopar no interior da chaminé.



Figura 36 – Posicionamento das sondas, do termopar e do tubo de Pitot no interior da chaminé

Para evitar que o material particulado proveniente da queima não prejudique os componentes do sistema encontram-se instalados logo após cada sonda, na parte exterior da chaminé, um filtro tipo membrana, em fibra de vidro com porosidade de 1 µm, como observa-se na figura 37.



Figura 37 – Vista geral dos filtros

Após os filtros encontra-se um sistema (o mesmo utilizado em campo) que possibilita a coleta e armazenagem de amostras em garrafas. De uma mesma sonda são coletados os gases tanto para os analisadores de CO e CO_2 quanto para o enchimento das garrafas. O sistema para coleta dos gases em garrafas passa por um banho em água a 5 °C para a retenção de água, depois segue pelo sistema de armazenamento utilizado no campo, o qual é responsável pelo enchimento e pressurização das garrafas. As figuras 38 e 39 ilustram o banho e o sistema de armazenamento dos gases nas garrafas.



Figura 38 – Coleta dos gases e banho em água a 5 °C



Figura 39 – Mesa de comando do sistema de amostragem de gases e pressurização das garrafas

As duas tubulações com amostras de gases são direcionadas para um *rack* cujo painel é ilustrado na figura 40. Existem nele dois circuitos de tubos separados, cada qual com um sistema de banho e armadilha. A tubulação que conduz amostras para análise de CO e CO_2 é conectada ao circuito que contém armadilha imersa em banho a – 35 ºC em álcool isopropílico, ilustrado na figura 41, para o fim de remover alcatrão e água da mesma.



Figura 40 – Painel do *rack* da linha de amostragem



Figura 41 – Banho com armadilha, para remoção de alcatrão e água

A outra tubulação, com amostras para análise de NO_X e UHC, é conectada em outro circuito que contém um banho em água para resfriar a amostra a 3 ºC, removendo a água por condensação.

Os analisadores estão ilustrados na figura 42 e listados na Tabela 5, já com a indicação do grupo a que pertence e respectivas escalas de trabalho em porcentagem de volume molar (%) ou em partes por milhão (ppm).



Figura 42 – Analisadores de gases de CO_2, CO, NO_x e UHC (OLIVEIRA, 2008)

Tabela 5 – Modelo e escala dos analisadores

	Analisador	Espécie	Escala
Grupo 1	Rosemount Analytical Model 400A	UHC	1 – 1000 ppm
	Rosemount Analytical Model 951A	NO_X	0 – 100 ppm
Grupo 2	Rosemount Analytical Model 880A	CO	0 – 5000 ppm
	Rosemount Analytical Model 880A	CO	0 – 5%
	Rosemount Analytical Model 880A	CO_2	0 – 18%
	Rosemount Analytical Model 755A	O_2	0 – 100%
	VEB Junkalor Dessau – DDR Permolyt 2	O_2	0 – 23%

Para o registro dos dados obtidos durante os experimentos utilizou-se uma aplicação no *software LabView*.

3.2.1 Combustão de eucalipto em laboratório

A biomassa utilizada para a realização dos testes em laboratório foi o eucalipto (*Eucalyptus citriodora*), espécie muito comum na região do Vale do Paraíba no Estado de São Paulo. Inicialmente optou-se por queimar biomassa nativa da floresta amazônica, porém o transporte não foi viável. Os troncos para a realização dos testes foram obtidos na própria área do INPE (área de 1162 hectares).

Os troncos derrubados foram cortados em pedaços de aproximadamente 40 cm de comprimento, separados de acordo com o diâmetro e acondicionados em um galpão fechado, próximo à área de testes, no qual permaneceram até o momento da queima.

Variáveis como o teor de umidade e a direção do vento podem interferir na combustão de biomassa (LOBERT *et al.*, 1999). Escolheram-se outras três variáveis para serem estudadas: diâmetro do tronco, inclinação da bandeja e vazão do ar, baseados nos experimentos realizados por Oliveira (2008), que utilizou em seus experimentos em laboratório, biomassa amazônica constituída de 90 % de galhos com diâmetro inferior a 2 cm outros 10% foram constituídos de liteira (gravetos e folhas), bandeja inclinada à 10º com ignição na parte frontal e vazão média de 600 m^3/h.

O diâmetro do tronco escolhido foi: menor ou maior que 2,5 cm; para simular os diferentes troncos encontrados na natureza. Esta diferença pode ser visualizada na figura 43.



Figura 43 – Variação dos diâmetros dos troncos

A inclinação da bandeja variou entre 0 e 10º simulando as ondulações do terreno, como pode ser visualizada na figura 44.



Figura 44 – Variação da inclinação da bandeja a 0° e a 10°

A vazão do ar variando entre 350 e 800 m^3/h para simular o vento. A figura 45 ilustra o medidor de vazão.



Figura 45 – Vista do medidor de vazão

Para cada experimento a porcentagem de liteira variou de 13 a 15% (baseado nos experimentos em capo em que a porcentagem de liteira é de 15% e nos experimentos realizados por Oliveira (2008) que utilizou 10% de liteira) em relação à massa dos galhos. O tempo gasto para cada experimento variou entre 17 e 25 min na grande maioria. A Figura 46 ilustra a disposição da biomassa na bandeja de queima.



Figura 46 – Disposição da biomassa sobre a bandeja antes da queima

As figuras a seguir (figuras 47 a 52) ilustram algumas etapas para cada experimento realizado. Pode-se observar a melhor disposição dos troncos para a queima, como a biomassa foi disposta sobre a bandeja de queima, a ignição feita com um maçarico alimentado de gás GLP, a mesa de comando com o sistema de aquisição dos gases provenientes da queima. Pode-se observar também como se realizou as anotações durante os experimentos e a planilha na qual se anotou os dados.



Figura 47 – Melhor maneira de intercalar os galhos



Figura 48 – Montagem da biomassa sobre a bandeja e pesagem das amostras



Figura 49 – Ignição com a utilização de um maçarico alimentado por GLP



Figura 50 – Mesa de comando do sistema de amostragem de gases para posterior análise cromatográfica



Figura 51 – Anotação dos dados durante os testes

COMBUSTÃO DE BIOMASSA – EUCALIPTO

TESTE	21
MASSA INICIAL GALHOS	1, 050 kg
MASSA INICIAL LITEIRA	0, 186 kg
MASSA INICIAL TOTAL	1.236 kg
PORCENTAGEM DA LITEIRA	14, 98%
TEMPO INICIAL DA IGNIÇÃO	42''
TEMPO FINAL DA IGNIÇÃO	1' 12''
MASSA FINAL DA BIOMASSA	0, 459 kg
CONDIÇÕES (vazão, inclin, diamet)	(- ; -)
TAG	#41
TEMPO TOTAL DE COLETA	21'04''
TEMPO TOTAL DE QUEIMA	21'04''

Obs.

Figura 52 – Exemplo de planilha preenchida

3.2.2 Cromatografia Gasosa

A técnica de cromatografia gasosa foi utilizada para separar as espécies químicas das amostras em uma coluna cromatográfica empacotada (Haye Sep; 12 ft) e detectar as quantidades de cada uma delas na amostra. Utilizou-se o cromatógrafo da PerkinElmer (Modelo Auto System). Auto-System é um sistema automatizado que controla os vários parâmetros que influenciam na análise: tempo, temperatura da câmara de injeção, temperatura da câmara da coluna, tipo de coluna, fluxo do gás de arraste, etc. Todos estes parâmetros são armazenados em arquivos chamados *Methods*

(métodos). Cada método é recomendado conforme a coluna e detectores utilizados, tempos de retenção, concentração esperada e separação de picos. A determinação dos parâmetros ideais para cada análise é feita utilizando-se padrões dos elementos a ser analisados, buscando-se a otimização da análise, o que significa a melhor separação e integração dos picos, no menor tempo possível, com o menor consumo de gases e de energia. As concentrações de gases de interesse nas amostras, calculadas pelo programa do integrador, só estarão corretas se usados os mesmos valores de temperatura, fluxo, etc. utilizados com as amostras-padrões durante a calibração (ALVES, 1998). O método utilizado, denominado EMI, foi ajustado para análise dos padrões e das amostras de gases tanto de Cruzeiro do Sul quanto as amostras provenientes da queima em laboratório.

Os parâmetros adotados no método EMI encontram-se sintetizados na Tabela 6 e a figura 53 apresenta a variação da temperatura do forno durante a análise cromatográfica.

Tabela 6 – Método EMI

Parâmetro	Valores adotados
Coluna Haye Sep	12 ft
Tempo do Experimento	53 min
Fluxo do gás de arraste (He)	30 ml/min
Temperatura do injetor	250°C
Temperatura do detector	350°C
Fluxo de H_2 no FID	45 ml/min
Fluxo de ar no FID	450 ml/min

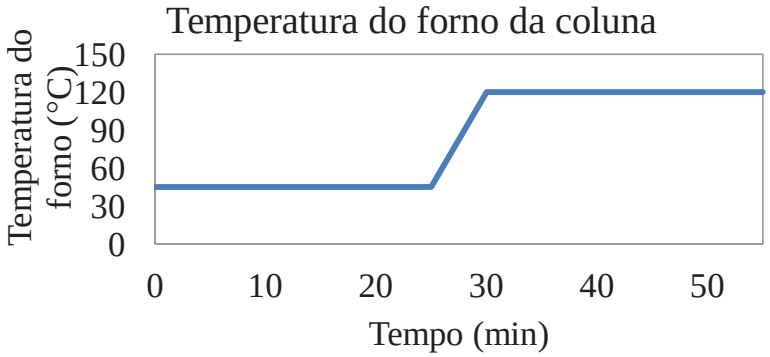


Figura 53 – Programa da temperatura do forno da coluna durante o processo de cromatografia

Após a separação das espécies na coluna, as mesmas são queimadas e detectadas quantitativamente em um detector do tipo de ionização de chama (FID). Para efetuar a quantificação dos gases de interesse contidos nas amostras coletadas, foi preciso obter a curva de calibração para cada espécie. Para isso, foram efetuadas análises de três padrões de calibração de concentrações conhecidas, certificados pela *Air Liquide*. Com as áreas obtidas construiu-se para cada gás uma curva padrão concentração *x* área. A partir destas curvas padrões, podem-se determinar as concentrações de gases (CO_2, CO, CH_4, C_2 e C_3) nas diferentes amostras.

A tabela 7 apresenta a concentração dos três padrões da *Air Liquide* utilizados.

Tabela 7 – Concentração dos padrões de calibração (ppm)

	Padrão 1	Padrão 2	Padrão 3
CO_2	298	1000	3000
CO	5,4	52,8	204
CH_4	5,9	18,3	46,9
C_2H_4	0,49	1,6	4
C_3H_6	0,49	1,5	3,9

Obs. Balanço em He

As figuras 54 e 55 a seguir ilustram o acoplamento das garrafas e o cromatógrafo.



Figura 54 – Padrão e garrafas acoplados à linha de transmissão: amostra x cromatógrafo



Figura 55 - Vista geral do cromatógrafo da *PerkimElmer*

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Comparação de resultados: Cruzeiro do Sul (2010) e Alta Floresta (2004)

Os fatores de emissão obtidos nas fases de chama (c) e incandescência (i) são apresentados na tabela 8. A fase chama caracteriza-se por uma maior emissão do CO_2, pois a combustão é mais completa. Nesta fase foram obtidos valores muito semelhantes de 1702 e 1690 g/kg em Cruzeiro do Sul e Alta Floresta (SOARES NETO *et al*, 2009), respectivamente. Em adição, observou-se uma maior emissão de particulados ($MP_{2,5}$), atingindo valores de 5,64 e 7,45 g/kg em Cruzeiro do Sul e Alta Floresta, respectivamente. Ainda nesta fase, obtiveram-se fatores de emissão para CO, CH_4 e NMHC (C_2 e C_3) muito semelhantes para as duas regiões queimadas.

Os fatores de emissão destes gases aumentam na fase de incandescência, pois nessa fase a combustão é incompleta, obtendo assim valores de 161,7 e 140,6 g/kg de CO em Cruzeiro do Sul e Alta Floresta, respectivamente. Consequentemente nesta fase as emissões de CO_2 e particulados foram menores, atingindo valores médios na ordem de 1535 e 3,0 g/kg para as duas regiões queimadas. Estes resultados estão de acordo com aqueles obtidos por Lobert *et al* (1991).

Tabela 8 - Fatores de Emissão (g/kg de biomassa seca)

Experimento	Fase	Fatores de Emissão (g/kg)				
		FE CO_2	FE CO	FE CH_4	FE NMHC	FE $MP_{2,5}$
Cruzeiro do Sul	c	1702	62	2,7	1,6	5,6
Cruzeiro do Sul	i	1533	162	11,0	4,1	2,2
Alta Floresta	c	1690	63	3,4	2,6	7,5
Alta Floresta	i	1540	141	13,1	7,5	3,9

A série de gráficos, ilustrados nas figuras de 56 a 60 apresenta a comparação dos graus de correlação entre as concentrações de gases específicos e do material particulado com a concentração de CO, encontrados em campo nas cidades de Alta Floresta (SOARES NETO *et al,* 2009) e Cruzeiro do Sul no ano de 2010.

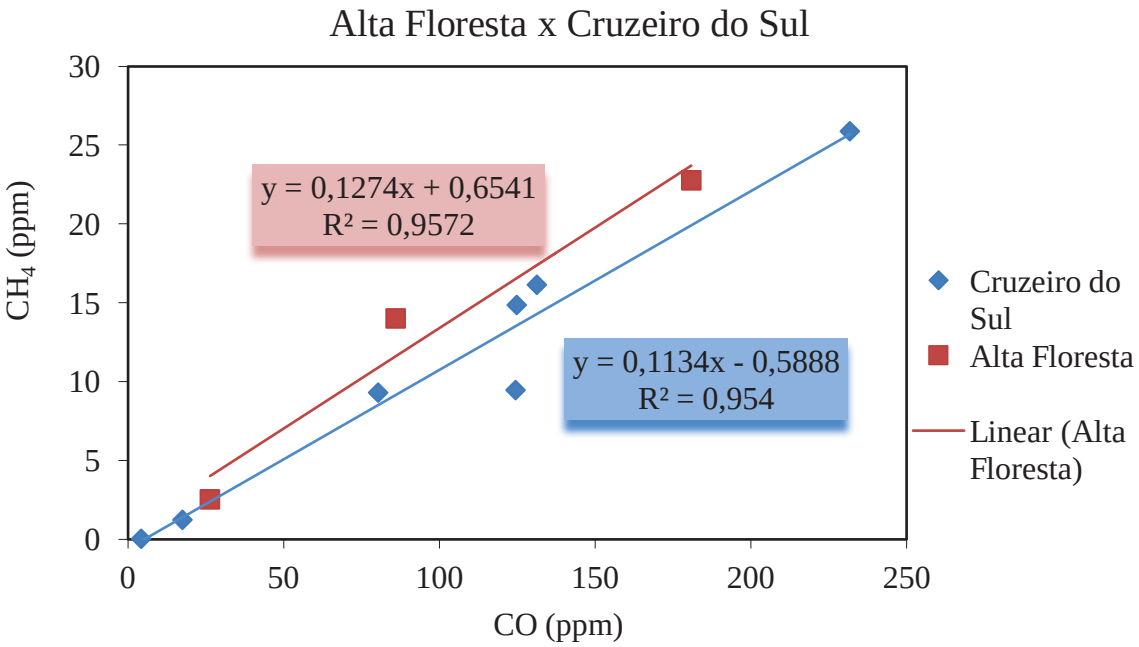


Figura 56 – Comparação entre a concentração de CO e CH4 obtidos por análise cromatográfica

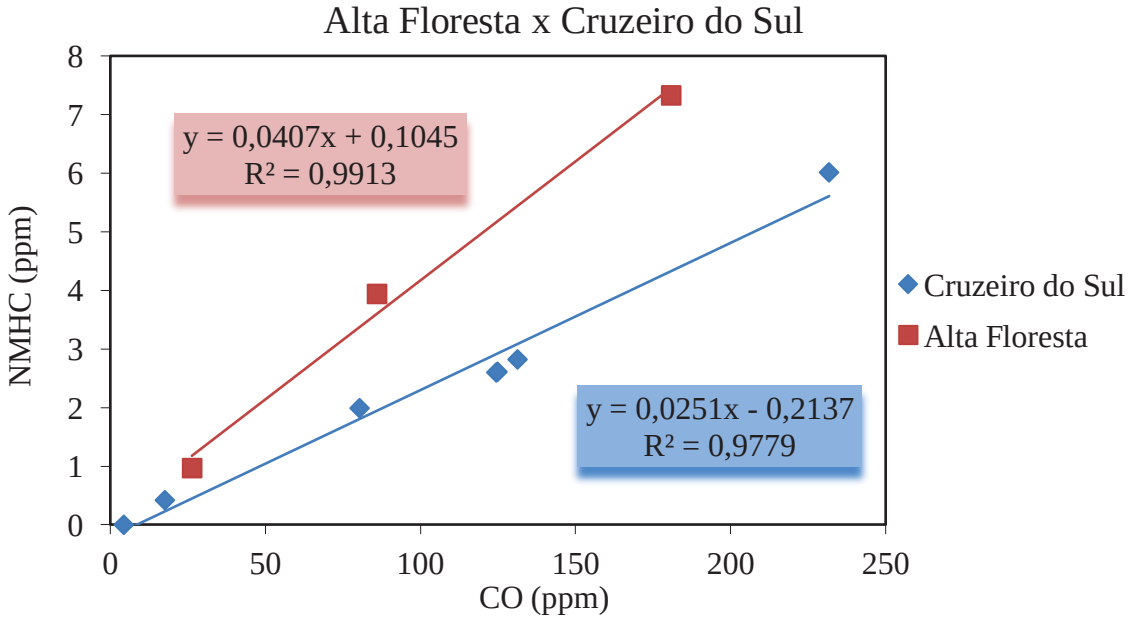


Figura 57 – Comparação entre a concentração de CO e NMHC obtidos por análise cromatográfica

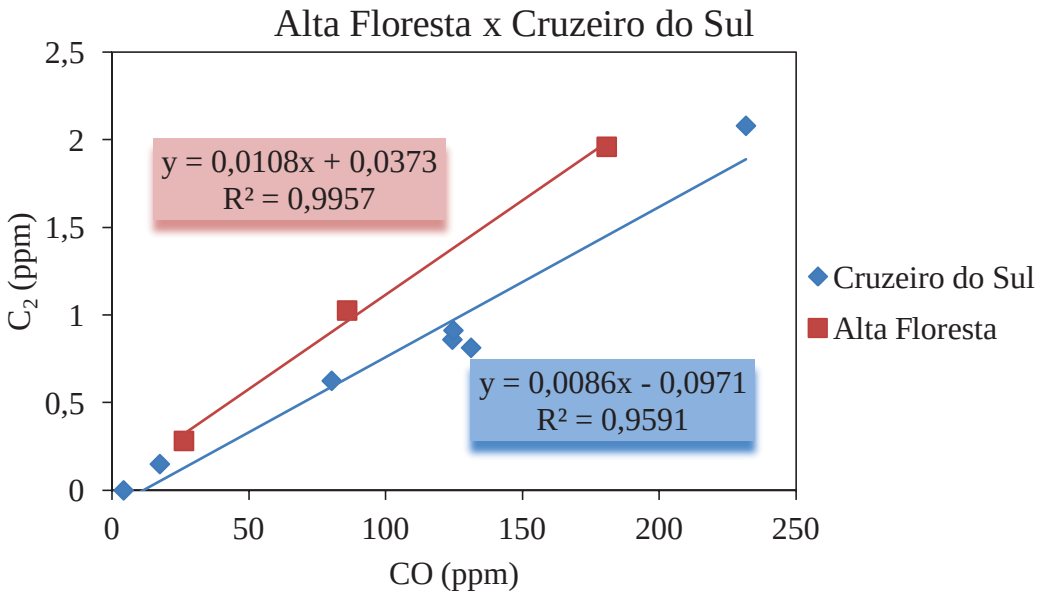


Figura 58 – Comparação entre a concentração de CO e C_2 obtidos por análise cromatográfica

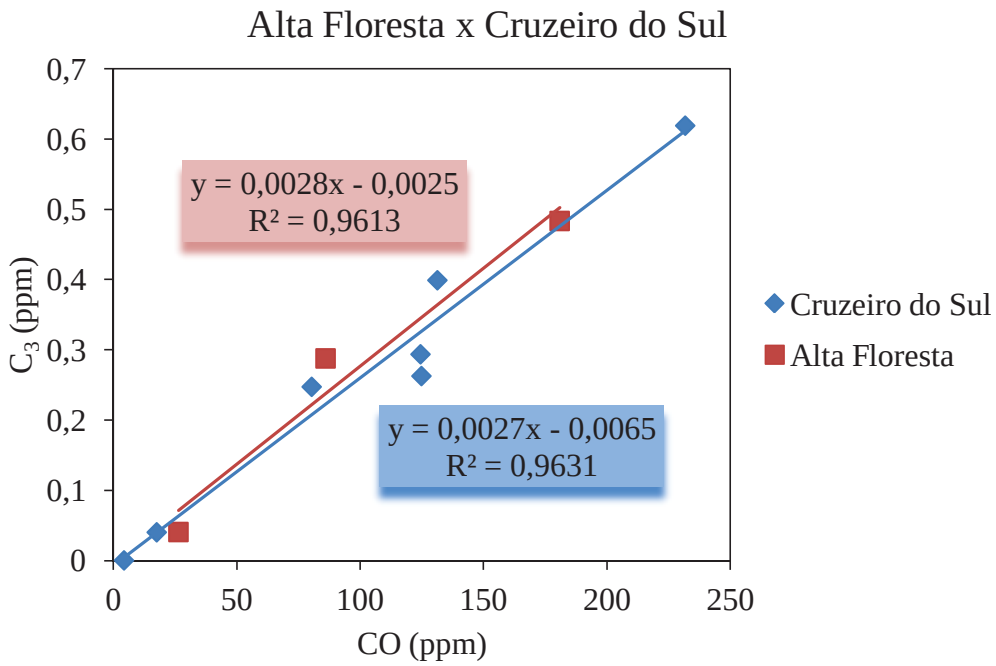


Figura 59 – Comparação entre a concentração de CO e C_3 obtidos por análise cromatográfica

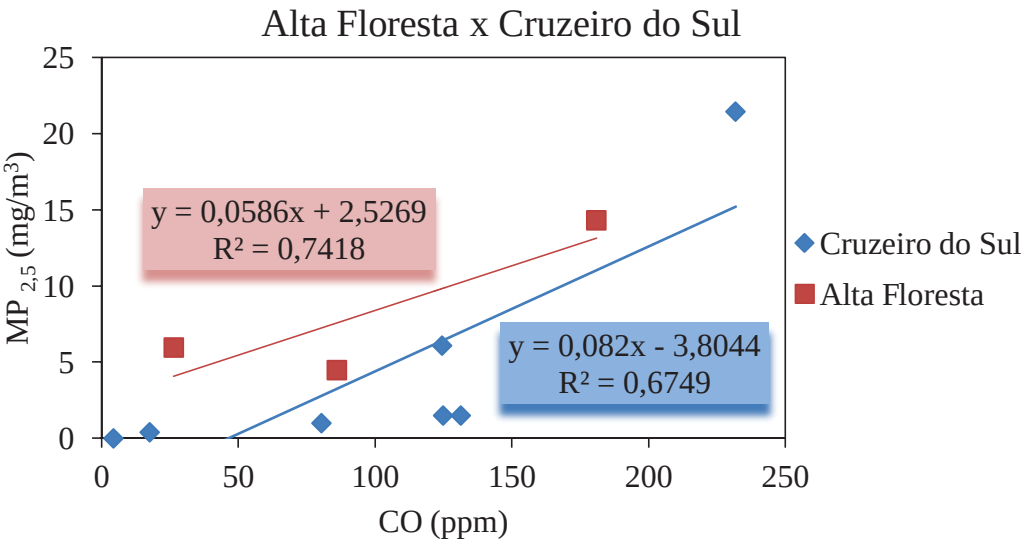


Figura 60 – Comparação entre a concentração de CO e $MP_{2,5}$ obtidos por análise cromatográfica

Tem-se que o sistema para coleta de gases para obtenção das amostras no campo funciona adequadamente, pois pode-se verificar que independentemente do local e do modo como os gases foram coletados, há uma forte correlação entre os valores obtidos para concentração de CO em relação a concentração dos demais gases. Embora a correlação entre a concentração de CO e o material particulado emitido não ser forte, há uma tendência entre os valores encontrados, ou seja, quanto maior a concentração de CO a emissão de $MP_{2,5}$ tenderá a ser maior.

De acordo com a tabela 9, os resultados obtidos para eficiência de combustão (EC) e eficiência de combustão modificada (ECM) para as fases de chama (c) e incandescência (i) em Cruzeiro do Sul foram muito similares aos obtidos em Alta Floresta (SOARES NETO *et al*, 2009).

Tabela 9 - Eficiências de Combustão

Experimento	Fase	EC	ECM
Cruz. do Sul	c	0,928	0,946
Cruz. do Sul	i	0,836	0,858
Alta Floresta	c	0,922	0,945
Alta Floresta	i	0,840	0,874

Os valores obtidos para a EC e ECM para as fases de chama e incandescência e apresentados na tabela 11, estão de acordo com Babbitt *et al* (1996), que considera fase de chama valores da EC > 0,90 e para a incandescência valores 0,75 < EC < 0,85.

As figuras 61, 62 e 63 apresentam as correlações entre os fatores de emissão de CO, CO_2 e CH_4 em relação à eficiência de combustão modificada, comparando dados da literatura (SOARES NETO *et al.*, 2009) com os resultados obtidos em campo em Cruzeiro do Sul.

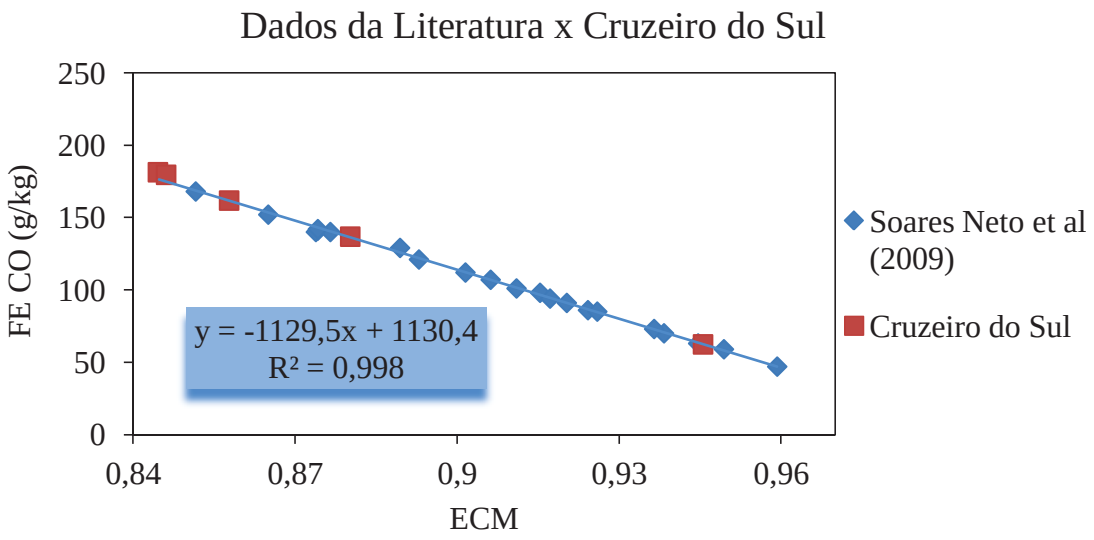


Figura 61 – Correlação entre FE de CO com ECM comparando dados da literatura com os resultados obtidos em Cruzeiro do Sul

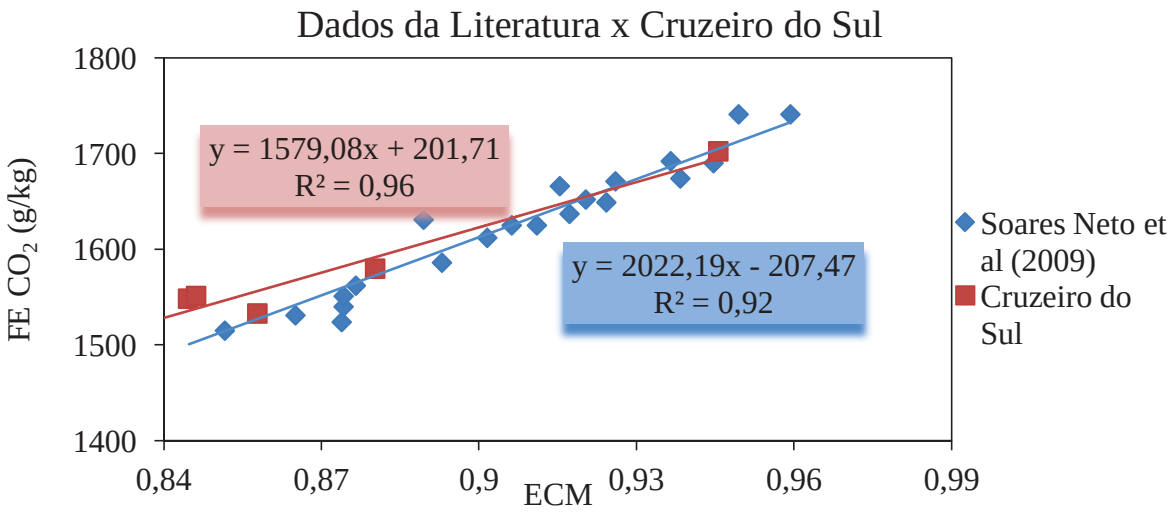


Figura 62 – Correlação entre FE de CO_2 com ECM comparando dados da literatura com os resultados obtidos em Cruzeiro do Sul

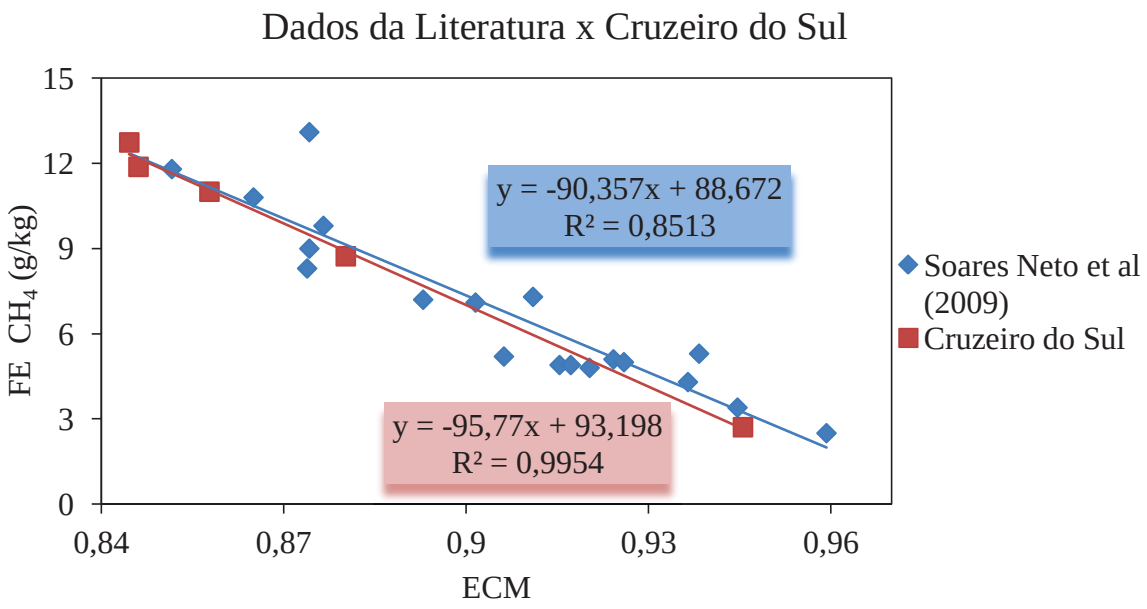


Figura 63 – Correlação entre FE de CH_4 com ECM comparando dados da literatura com os resultados obtidos em Cruzeiro do Sul

Nota-se uma boa correlação nos três dados analisados e que os valores encontrados estão de acordo com os dados publicados na literatura.

Os dados na tabela 10, referem-se a quantidade de carbono emitido associado a cada gás.

Tabela 10- Quantidade de carbono emitido em Cruzeiro do Sul

Garrafa	Fase	Total C emitido em (mg/m^3)					
		$C\text{-}CO_2$	C-CO	$C\text{-}CH_4$	C-NMHC	$C\text{-}MP_{2,5}$	C-total
0	BG	187	3	0,9	0,0	0,0	190
1		11	2	0,0	0,0	3,7	17
2	Chama	1059	61	4,6	3,0	12,9	1140
3		834	114	12,7	6,8	0,9	968
4	Incandescência	369	61	7,3	2,9	0,9	441
5		350	64	7,9	3,4	0,6	426
6		216	39	4,6	2,3	0,2	263
7		34	9	0,6	0,5	0,2	44

OBS: Para os valores citados, referente às garrafas de 1 a 7, descontou-se o valor do *Background* (BG).

Pode-se comparar na Figura 64 a relação entre os fatores de emissão de CH_4 e CO, obtidos em campo nas cidades de Alta Floresta em 2004, com os obtidos em Cruzeiro do Sul no ano de 2010.

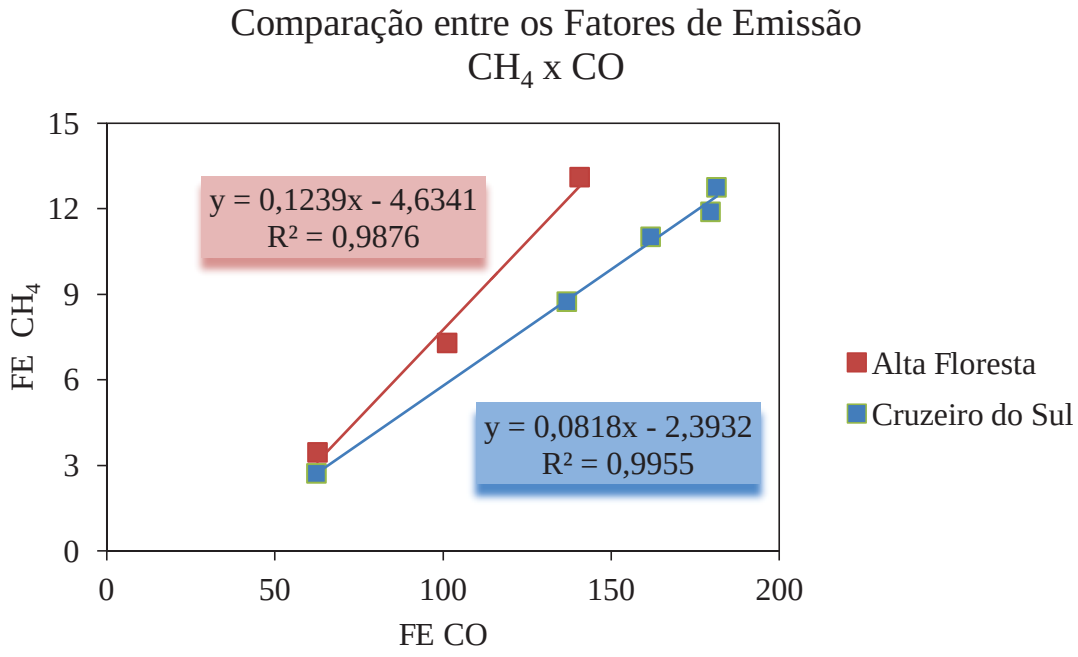


Figura 64 – Comparação entre os fatores de emissão de CO e CH_4

Nota-se que os dados possuem uma boa correlação, ou seja, a emissão de CH_4 está relacionada com a emissão de CO, pois independente do local e ano em que os experimentos foram realizados e independente do modo como os dados foram coletados, quanto maior a emissão de CO maior será a emissão de CH_4.

4.1.1 Consumo de biomassa e fatores de emissão

A média de carbono estimada para a biomassa seca da região de Cruzeiro do Sul foi de 48%. O teor de umidade calculado para a biomassa constituída de troncos largos foi de 42% em base seca e para galhos finos estimou-se um teor de umidade de 17%. Estimou-se também que a quantidade de massa com diâmetros maiores que 10 cm era de 583 t/ha. Os troncos menores, com diâmetros menores que 10 cm, foram estimados em 105 t/ha. A quantidade de carbono antes da queima foi estimada em 204 t/ha. A

taxa de consumo de biomassa calculada foi de 24% para troncos largos e de 89% de galhos finos, em média houve um consumo de biomassa de 37%. A média para os fatores de emissão de CO_2, CO, CH_4, NMHC, e $MP_{2,5}$ para as 3 horas de amostragem foi de 1513 ± 151; 157 ± 53; 8,2 ± 4,7; 3,9 ± 2,3 e 1,9 ± 2,1 g/kg para queima de biomassa seca. Calculou-se que um hectare de floresta queimada produziu 232115 kg de CO_2, 24141 kg de CO, 1254 kg de CH_4, 596 kg de NMHC e 285 kg de $MP_{2,5}$.

Assim, tem-se que a quantidade de CO_2, liberado para a atmosfera, levando-se em consideração que a taxa média de desmatamento na região amazônica no período de 2000 a 2011 (INPE, 2011) foi de 15815 km²/ano, é de 457 Mt/ano.

A taxa de emissão de CO_2 equivalente de 457 Mt/ano, para as queimadas na floresta amazônica, corresponde a 0,91% do total das emissões globais de gases do efeito estufa (total de 50 Gt de CO_2 equivalente), relatado por BARKER *et al* (2007).

4.2 Experimentos em laboratório

Testes em laboratório foram realizados no período de dezembro de 2010 a junho de 2012. Os testes foram realizados de maneira aleatória variando os níveis dos fatores.

Os testes realizados no período de dezembro de 2010 a fevereiro de 2011 foram analisados pelos analisadores de gases. Os testes realizados no período de maio de 2012 a junho de 2012 foram analisados por cromatografia.

A sequência de fotos (figuras 65 a 72) a seguir ilustra cada experimento realizado no período de dezembro de 2010 a fevereiro de 2011.



Figura 65 – Fases do experimento (1)



Figura 66 – Fases do experimento *a*



Figura 67 – Fases do experimento *b*



Figura 68 – Fases do experimento *ab*



Figura 69 – Fases do experimento *c*



Figura 70 – Fases do experimento *ac*



Figura 71 – Fases do experimento *bc*



Figura 72 – Fases do experimento *abc*

A tabela 11 apresenta os valores médios para o tempo, massa inicial e final e porcentagem de liteira e umidade para os primeiros experimentos realizados.

Tabela 11 – Valores médios dos experimentos

Tempo	Massa Inicial	Massa Final	% de liteira	% de galhos	Consumo de biomassa
23 min	1550 g	500 g	14%	86%	68%

A porcentagem de consumo de biomassa (68%) dos experimentos realizados em laboratório possui variação de aproximadamente 17% em relação ao experimento realizado em Cruzeiro do Sul, em que se obteve um consumo médio de 56% e de 13%

em relação a experimentos realizados em laboratório com biomassa amazônica, em que se obteve um consumo médio de 77,5% (SOARES NETO, 2011).

Para cada teste recolheu-se uma pequena amostra no inicio do experimento para o cálculo da umidade. Esta amostra foi colocada em saquinhos de papel, depois foram pesadas e acondicionadas na estufa a uma temperatura de 103 ± 2 °C. As amostras eram retiradas, pesadas e recolocadas na estufa após 24 h, 48 h, 72 h e assim sucessivamente até a obtenção de massa constante conforme disposição da Norma NBR 7190/97 (ABNT, 1997). Liteira e galhos mais finos atingiram massas uniformes mais rapidamente que os troncos com diâmetros superiores a 2,5 cm. O tempo para a massa de cada amostra se estabilizar variou entre 3 e 10 dias. Quando a madeira atinge um ponto de equilíbrio com o meio ambiente, ou seja, adquire uma umidade nas condições atmosféricas local, apresenta 12% de umidade conforme a NBR 7190/97 (ABNT, 1997).

Na tabela 12, são apresentados os valores médios do teor de umidade encontrados para cada experimento considerando liteira e troncos, nota-se que estes valores estão bem próximos ao determinado pela NBR 7190/97 (ABNT, 1997).

Tabela 12 – Teor de umidade para cada experimento

Experimento	Teor umidade (W%)
(1)	16,9%
a	12,5%
b	15,5%
ab	12,5%
c	13,8%
ac	14,8%
bc	12,8%
abc	12,5%
Média	13,9%
Desvio Padrão	2,0%

4.2.1 Análise dos resultados obtidos pelos analisadores de gases

Durante os testes as variáveis medidas (emissão de CO, CO_2, NO_x e UHC; tempo de duração das fases da queima, perda de massa durante as fases da queima, vazão dos

gases na chaminé, temperatura dos gases na chaminé e próximo à chama) foram transmitidas em tempo real para um sistema de aquisição de dados no qual são registradas de maneira contínua. Com estes dados foi possível calcular a concentração média líquida dos gases, observados na tabela 13; a partir destes dados calculou-se a quantidade de carbono emitido associado a cada gás, apresentado na tabela 14, e os fatores de emissão listados na tabela 15. O *software* usado para a aquisição de dados foi o *LabView*.

Tabela 13 – Concentração média líquida dos gases em ppm

Experimento	CO_2	CO	NO_X	UHC
(1)	2786	199	4,9	95,7
a	2055	128	2,3	292,2
b	2566	75	3,4	118,9
ab	2195	101	3,1	42,6
c	2098	137	4,0	52,2
ac	3669	210	3,9	81,2
bc	1737	219	2,3	110,3
abc	4128	220	3,9	77,0
Média	2654	161	3,5	108,8
Desvio Padrão	841	58	0,9	78,6

Tabela 14 - Quantidade de carbono em mg/m^3 emitido associado a cada gás

Experimento	C-CO_2	C-CO	C-UHC	C-Total
(1)	1365	98	47	1509
a	1006	63	143	1212
b	1257	37	58	1352
ab	1075	50	21	1146
c	1027	67	26	1120
ac	1797	103	40	1940
bc	851	107	54	1012
abc	2022	108	38	2167
Média	1300	79	53	1432
Desvio Padrão	412	28	39	417

Tabela 15 - Fator de emissão (FE) em g/kg

Experimento	CO_2	CO	UHC
(1)	1259	58	2,3
a	1410	57	1,6
b	1436	27	2,0
ab	1413	42	2,1
c	1311	55	2,7
ac	1519	56	1,7
bc	1148	94	1,6
abc	1408	48	1,4
Média	1363	55	1,9
Desvio Padrão	117	19	0,4

Com os dados coletados em cada teste, construíram-se gráficos com o intuito de analisar o fenômeno da combustão da amostra. Estes gráficos apresentam as concentrações dos gases obtidas pelos analisadores ao longo do experimento. Como as escalas utilizadas em cada gás são diferentes entre si, os dados foram normalizados, ou seja, dividiram-se todos os dados de concentração de cada gás pela concentração máxima obtida para cada um respectivamente. Com isso, transformou-se os dados para um intervalo que varia entre 0 e 1, padronizando todas as concentrações em um intervalo só a fim de avaliar a correlação entre as emissões.

Tem-se que as emissões de CO_2 e NO_x estão diretamente ligadas ao processo de combustão em chama e tendem a caminhar juntas, sendo que as maiores emissões destes gases ocorrem no momento em que as chamas se mostraram mais intensas. A temperatura acompanha a emissão de CO_2 e NO_x já que estas estão relacionadas com a combustão com chamas.

As emissões de CO e de UHC aumentam com a diminuição da emissão de CO_2, pois estas emissões estão ligadas ao o processo de incandescência.

A variação da massa durante experimento é maior enquanto o processo de combustão está com maior intensidade de chamas. Notam-se nos momentos em que a variação de massa é maior, as emissões de CO_2 e NO_x também o são, e conforme a combustão passa a se caracterizar pela incandescência, a variação de massa diminui, assim como a emissão dos dois gases, e, por contrapartida, a emissão de CO e de UHC aumenta.

As figuras de 73 a 80 ilustram esses dados normalizados para cada experimento. A tabela 16 apresenta os valores calculados para a eficiência de combustão e a eficiência de combustão modificada.

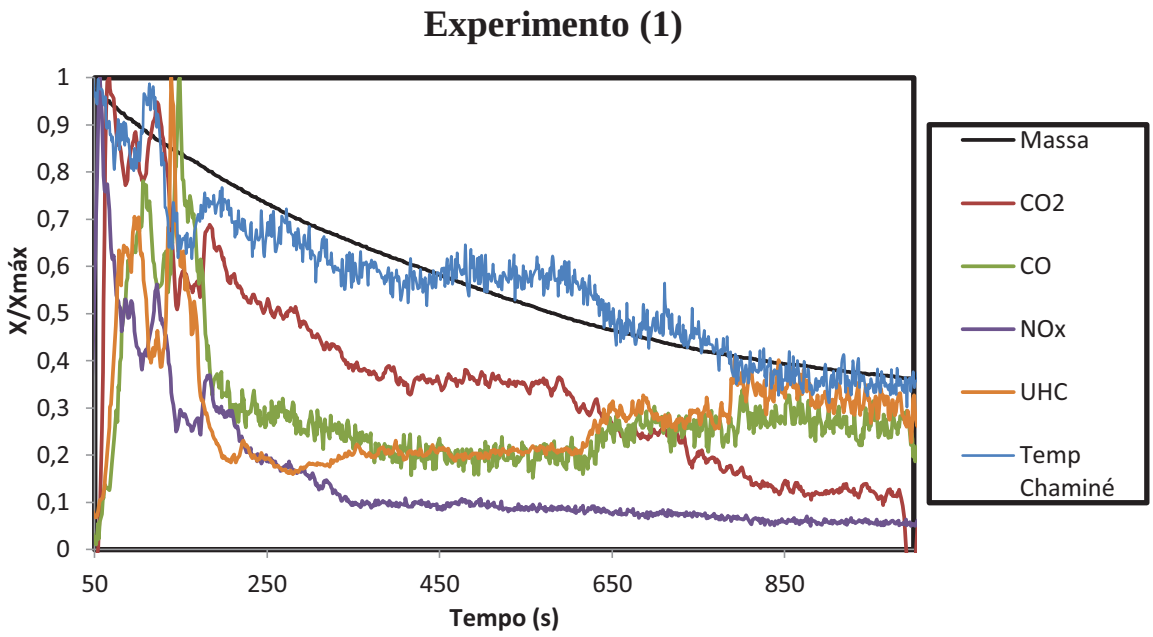


Figura 73 – Dados normalizados do experimento (1)

O experimento (1) foi realizado nas seguintes condições: diâmetro do tronco maior que 2,5 cm, inclinação da bandeja de 10° e vazão do ar 800 m^3/h. Observa-se um bom comportamento das curvas de emissão.

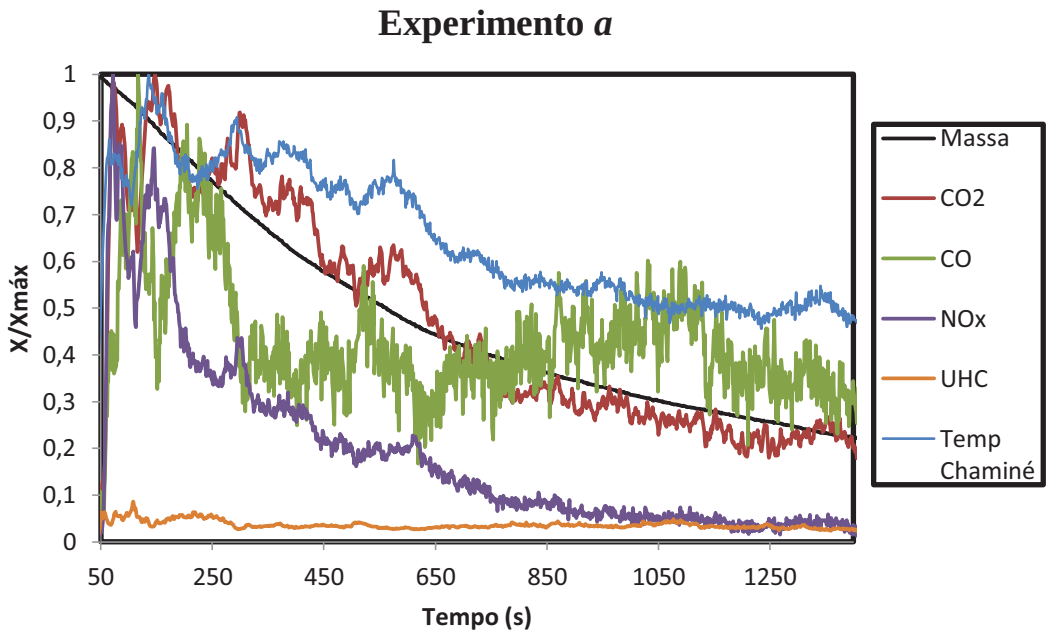


Figura 74 – Dados normalizados do experimento *a*

O experimento *a* foi realizado nas seguintes condições: diâmetro do tronco menor que 2,5 cm, inclinação da bandeja de 10° e vazão do ar 800 m^3/h. Neste experimento observa-se o não funcionamento do analisador de UHC. As outras variáveis estudadas apresentaram um bom comportamento.

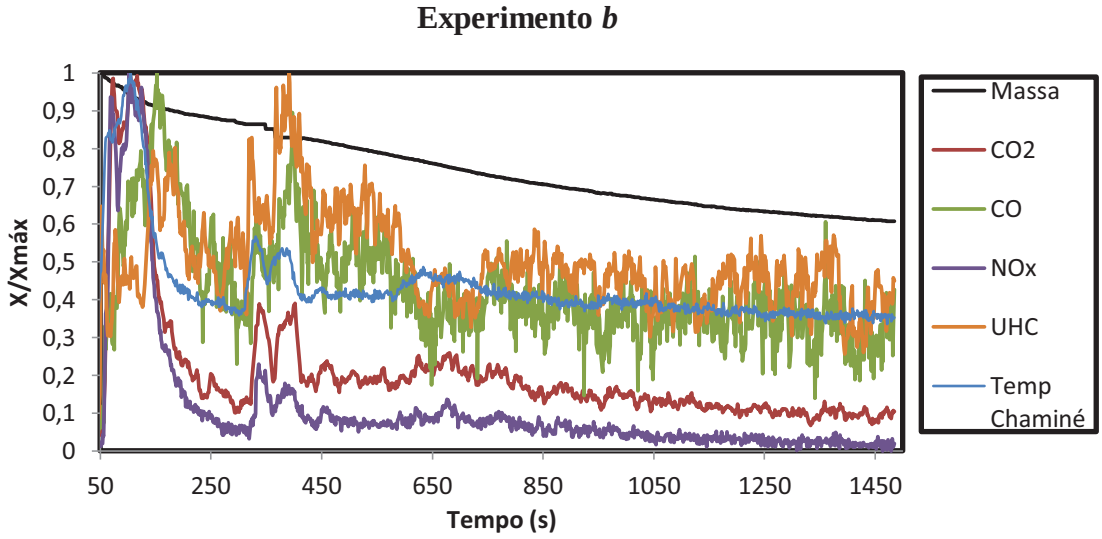


Figura 75 – Dados normalizados do experimento *b*

O experimento *b* foi realizado nas seguintes condições: diâmetro do tronco maior que 2,5 cm, inclinação da bandeja de 0° e vazão do ar 800 m^3/h. Nota-se um pequeno consumo de biomassa.

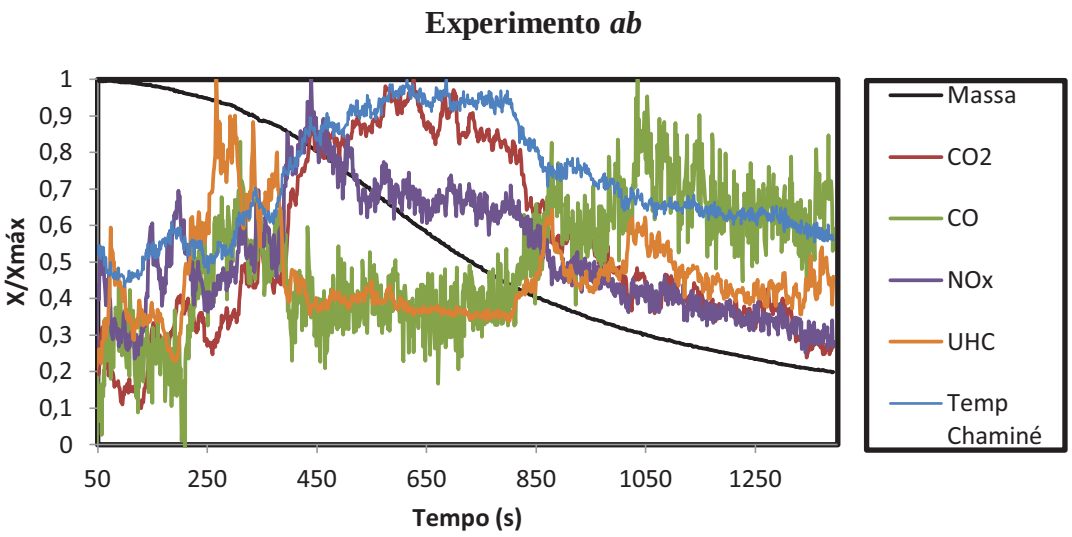


Figura 76 – Dados normalizados do experimento *ab*

O experimento *ab* foi realizado nas seguintes condições: diâmetro do tronco menor que 2,5 cm, inclinação da bandeja de 0° e vazão do ar 800 m^3/h.

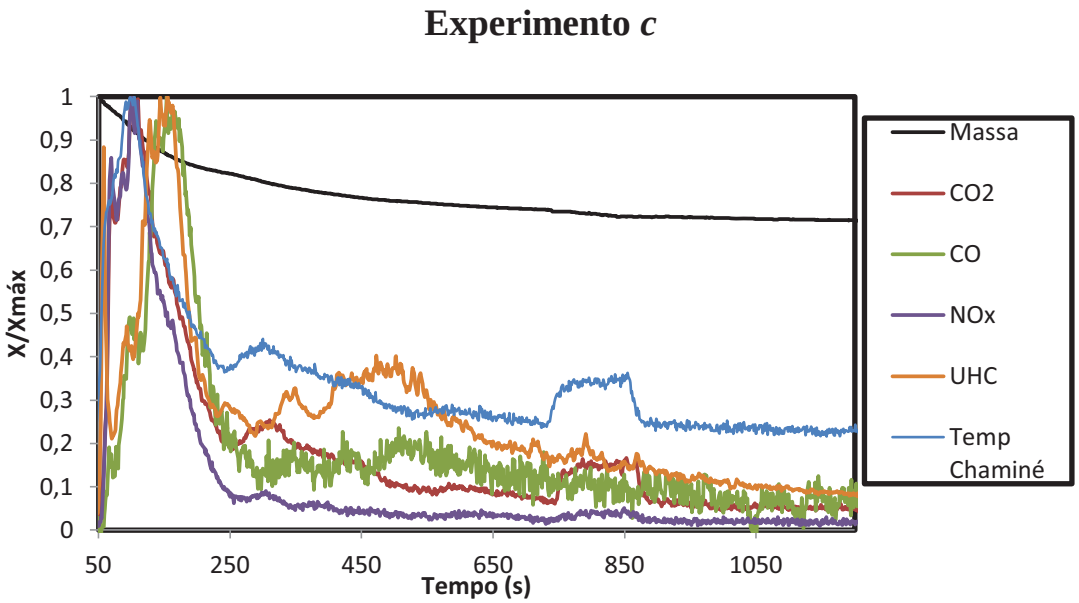


Figura 77 – Dados normalizados do experimento *c*

O experimento *c* foi realizado nas seguintes condições: diâmetro do tronco maior que 2,5 cm, inclinação da bandeja: 10° e vazão do ar 400 m^3/h. Observa-se pouco consumo de biomassa e em consequência valores baixos para a emissão dos gases em estudo principalmente para o CO_2 que não apresentou pico devido a curta fase de chama. Não houve um aumento significativo de temperatura.

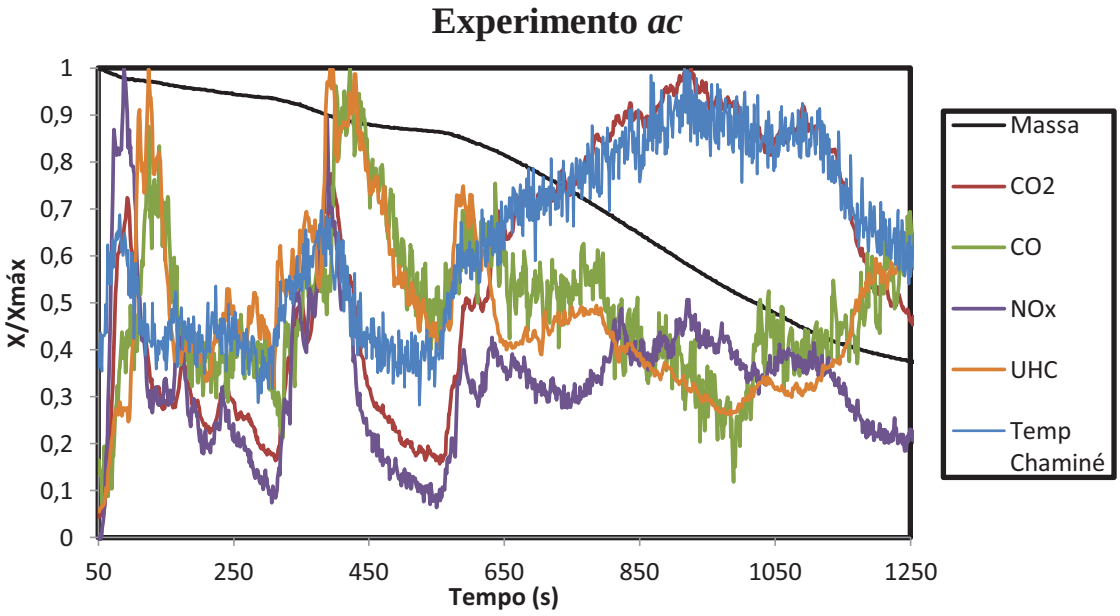


Figura 78 – Dados normalizados do experimento *ac*

O experimento *ac* foi realizado nas seguintes condições: diâmetro do tronco menor que 2,5 cm, inclinação da bandeja: 10° e vazão do ar 400 m^3/h. Houve um bom consumo de biomassa e nota-se que a partir do instante 950 s quando os valores para temperatura e concentração de CO_2 começam a diminuir as concentrações de CO e UHC começam a aumentar.

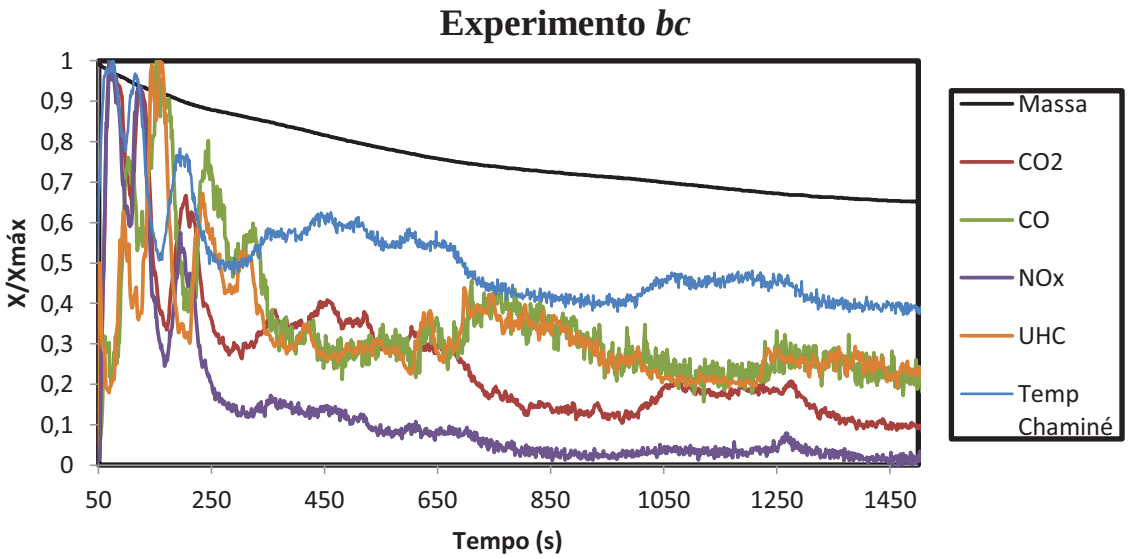


Figura 79 – Dados normalizados do experimento *bc*

O experimento *bc* foi realizado nas seguintes condições: diâmetro do tronco maior que 2,5 cm, inclinação da bandeja: 0° e vazão do ar 400 m^3/h. Tem-se um bom comportamento das curvas. Nota-se também um pequeno consumo de biomassa.

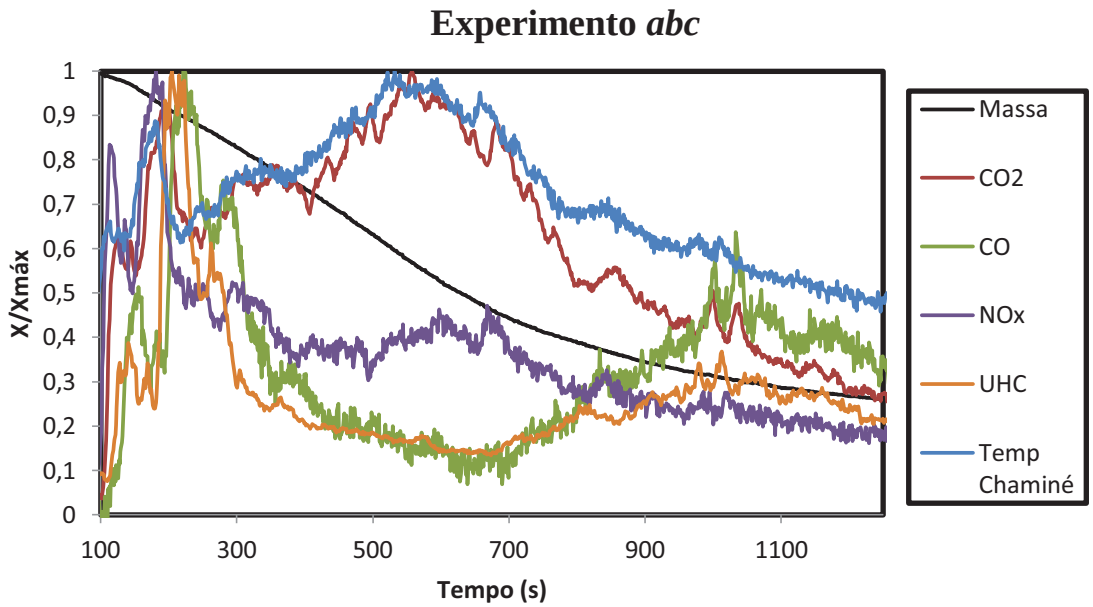


Figura 80 – Dados normalizados do experimento *abc*

O experimento *abc* foi realizado nas seguintes condições: diâmetro do tronco menor que 2,5 cm, inclinação da bandeja a 0° e vazão do ar 400 m^3/h. Para estas condições houve um bom consumo de biomassa. Nota-se que a emissão de CO_2 e de NO_x, varia em função da temperatura da chaminé. Próximo ao instante 650 s nota-se uma diminuição da temperatura e por consequência um aumento na emissão do CO e do UHC.

Tabela 16 - Eficiência de combustão (EC) e eficiência de combustão modificada (ECM) dada pelos analisadores de gases

Experimento	EC	ECM
(1)	0,69	0,93
a	0,78	0,94
b	0,79	0,97
ab	0,78	0,96
c	0,72	0,94
ac	0,84	0,95
bc	0,63	0,89
abc	0,77	0,95
Média	0,75	0,94
Desvio Padrão	0,06	0,02

O experimento que apresentou a melhor eficiência de combustão foi o experimento *ac*, realizado com troncos finos e vazão baixa.

4.2.2 Análise dos resultados obtidos por cromatografia

A sequência de fotos (figura 81) ilustra um experimento realizado nas condições: diâmetro menor que 2,5 cm, inclinação de 0° e vazão de 700 m^3/h; no dia 28 de maio de 2012.

Para cada condição experimental foram realizados 2 ensaios. Todos os resultados apresentados referem-se à média dos resultados encontrados para cada condição.

Após a realização dos experimentos, realizou-se uma análise quantitativa da concentração dos gases nas amostras coletadas nas garrafas com o emprego do cromatógrafo. Calculou-se a área formada sob os picos de cada gás, pois a intensidade do sinal que chega ao detector é proporcional à quantidade da substância presente na amostra, e por regressão linear foi possível calcular as concentrações médias de cada gás em estudo. A tabela 17 apresenta os valores médios para os experimentos realizados no período de maio a junho de 2012. As tabelas 18 e 19 apresentam as concentrações médias e concentrações líquidas dos gases encontrados para cada experimento. A partir das concentrações médias líquidas e da equação 3, é possível calcular a quantidade de carbono emitido associado a cada gás analisado. Os valores encontrados estão na tabela 20. A tabela 21 apresenta os fatores de emissão para cada gás e a tabela 22 os valores calculados para a eficiência de combustão e a eficiência de combustão modificada.

Tabela 18 – Valores médios dos experimentos realizados

Tempo	Massa Inicial	Massa Final	% de liteira	% de galhos	Consumo de biomassa
17 min	1332 g	490 g	14%	86%	63%

A porcentagem de consumo de biomassa (63%) dos experimentos realizados em laboratório possui variação de aproximadamente 11% em relação ao experimento realizado em Cruzeiro do Sul, em que se obteve um consumo médio de 56%, de 18% em relação aos experimentos realizados em laboratório com biomassa amazônica, em que se obteve um consumo médio de 78% (SOARES NETO, 2011) e de 9% em relação aos experimentos realizados com eucalipto neste trabalho (período de dezembro 2010 a fevereiro de 2011).

A umidade média calculada para liteira foi de 14% e a umidade para os troncos foi 12%.



Figura 81 – Ilustração de um experimento *abc*

Tabela 18 – Concentração dos gases em ppm obtidos por cromatografia

Experimento	Condição	CO	CH_4	CO_2	C_2H_4	C_2H_6	C_3H_6	C_3H_4	C_3H_8
0	BG	6	2	433	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
(1)	(- - -)	133	17	2769	2,1	0,3	0,6	0,3	1,2
a	(+ - -)	182	23	4585	2,1	0,4	0,6	0,3	1,2
b	(- + -)	125	18	3145	2,0	0,2	0,5	0,4	2,0
ab	(+ + -)	139	18	3764	3,7	0,2	0,7	0,4	1,1
c	(- - +)	197	22	3241	3,2	0,5	1,0	0,5	1,8
ac	(+ - +)	229	28	5819	2,8	0,5	0,8	0,5	1,1
bc	(- + +)	162	20	2532	2,1	0,3	0,7	0,5	2,8
abc	(+ + +)	215	27	5624	2,4	0,3	0,6	0,5	2,5

Tabela 19 - Concentração média líquida dos gases em ppm obtidos por cromatografia

Experimento	Condição	CO	CH_4	CO_2	C_2H_4	C_2H_6	C_3H_6	C_3H_4	C_3H_8
(1)	(- - -)	127	15	2336	2,1	0,3	0,6	0,3	1,2
a	(+ - -)	176	22	4152	2,1	0,4	0,6	0,3	1,2
b	(- + -)	119	16	2712	2,0	0,2	0,5	0,4	2,0
ab	(+ + -)	132	16	3331	3,7	0,2	0,7	0,4	1,1
c	(- - +)	191	20	2808	3,2	0,5	1,0	0,5	1,8
ac	(+ - +)	223	26	5386	2,8	0,5	0,8	0,5	1,1
bc	(- + +)	156	18	2099	2,1	0,3	0,7	0,5	2,8
abc	(+ + +)	209	25	5191	2,4	0,3	0,6	0,5	2,5
Média		167	20	3502	2,6	0,3	0,7	0,4	1,7
Desvio Padrão		39	4	1270	0,6	0,1	0,2	0,1	0,7

Tabela 20 - Quantidade de carbono em mg/m^3 emitido associado a cada gás

Experimento	C-CO	C-CH_4	C-CO_2	C-C_2H_4	C-C_2H_6	C-C_3H_6	C-C_3H_4	C-C_3H_8	C-TOTAL
(1)	62	7	1147	1,0	0,1	0,3	0,1	0,6	1218
a	86	11	2038	1,0	0,2	0,3	0,2	0,6	2137
b	58	8	1331	1,0	0,1	0,3	0,2	1,0	1400
ab	65	8	1635	1,8	0,1	0,3	0,2	0,5	1711
c	94	10	1378	1,6	0,3	0,5	0,3	0,9	1486
ac	109	13	2643	1,4	0,2	0,4	0,2	0,6	2768
bc	76	9	1030	1,1	0,1	0,3	0,3	1,4	1119
abc	103	12	2548	1,2	0,2	0,3	0,2	1,2	2666
Média	82	10	1719	1,3	0,2	0,3	0,2	0,8	1813
Desvio Padrão	19	2	623	0,3	0,1	0,1	0,0	0,3	640

Tabela 21 - Fator de emissão (FE) em g/kg

Experimento	CO	CH_4	CO_2	C_2H_4	C_2H_6	C_3H_6	C_3H_4	C_3H_8
(1)	48	3,6	1515	0,8	0,1	0,3	0,2	0,7
a	42	3,0	1558	0,5	0,1	0,2	0,1	0,5
b	38	3,0	1340	0,6	0,1	0,2	0,2	1,0
ab	38	2,8	1469	1,0	0,1	0,3	0,2	0,5
c	59	3,6	1308	1,0	0,2	0,5	0,2	0,9
ac	39	2,6	1462	0,5	0,1	0,2	0,1	0,3
bc	60	3,9	1264	0,8	0,1	0,4	0,3	1,6
abc	41	2,8	1580	0,5	0,1	0,2	0,1	0,7
Média	46	3,2	1437	0,7	0,1	0,3	0,2	0,8
Desvio padrão	9	0,5	119	0,2	0,0	0,1	0,1	0,4

Tabela 22 - Eficiência de combustão e eficiência de combustão modificada

Experimento	EC	ECM
(1)	0,83	0,95
a	0,86	0,96
b	0,74	0,96
ab	0,81	0,96
c	0,72	0,94
ac	0,80	0,96
bc	0,70	0,93
abc	0,87	0,96
Média	0,79	0,95
Desvio Padrão	0,07	0,01

De acordo com os resultados obtidos o experimento que apresentou melhor eficiência de combustão foi o *abc*, realizado com todas as variáveis no nível alto.

Comparando os resultados obtidos por cromatografia e pelos analisadores de gases, pode-se verificar na tabela 23 que o coeficiente de variação (CV) encontrado entre os fatores de emissão é muito pequeno. As maiores variações ocorrem com os valores para a emissão de CO, devido ao analisador de gás utilizado apresentar pequenas variações de estabilidade durante a realização dos testes.

Tabela 23 – Coeficiente de variação entre os cálculos dos fatores de emissão

Experimento	FE[a] CO	FE[b] CO	CV	FE[a] CO_2	FE[b] CO_2	CV
(1)	58	48	14%	1259	1515	13%
a	57	42	20%	1410	1558	7%
b	27	38	23%	1436	1340	5%
ab	42	38	7%	1413	1469	3%
c	55	59	5%	1311	1308	0%
ac	56	39	26%	1519	1462	3%
bc	94	60	31%	1148	1264	7%
abc	48	41	13%	1408	1580	8%
Média	55	46	13%	1363	1437	4%

[a] Resultados gerados pelos analisadores de gases
[b] Resultados gerados por cromatografia

Essa variação é ainda menor quando se compara a eficiência de combustão e a eficiência de combustão modificada. Os dados estão apresentados na tabela 24.

Tabela 24 – Comparação entre a eficiência de combustão e a eficiência de combustão modificada

Experimento	EC[a]	EC[b]	CV	ECM[a]	ECM[b]	CV
(1)	0,69	0,83	13%	0,93	0,95	1%
a	0,78	0,86	7%	0,94	0,96	1%
b	0,79	0,74	5%	0,97	0,96	1%
ab	0,78	0,81	3%	0,96	0,96	0%
c	0,72	0,72	0%	0,94	0,94	0%
ac	0,84	0,80	3%	0,95	0,96	1%
bc	0,63	0,70	7%	0,89	0,93	3%
abc	0,77	0,87	8%	0,95	0,96	1%
Média	0,75	0,79	4%	0,94	0,95	1%

[a] Resultados gerados pelos analisadores de gases
[b] Resultados gerados por cromatografia

Nota-se que os experimentos realizados nas condições *bc* (tronco maior que 2,5 cm, inclinação de 0° e vazão de 350 a 400 m^3/h) apresentaram os piores coeficientes para a eficiência da combustão. Isso se deve ao fato de serem consumidos apenas 23% da biomassa inicial. Nota-se também que há uma emissão maior de CO, pois a fase de incandescência é maior neste caso, e por consequência uma emissão menor de CO_2, tantos nos experimentos analisados pela cromatografia como pelos analisadores de gases.

Nas figuras 82 e 83 apresentam-se a correlação entre a eficiência de combustão modificada e os fatores de emissão de CO e CO_2.

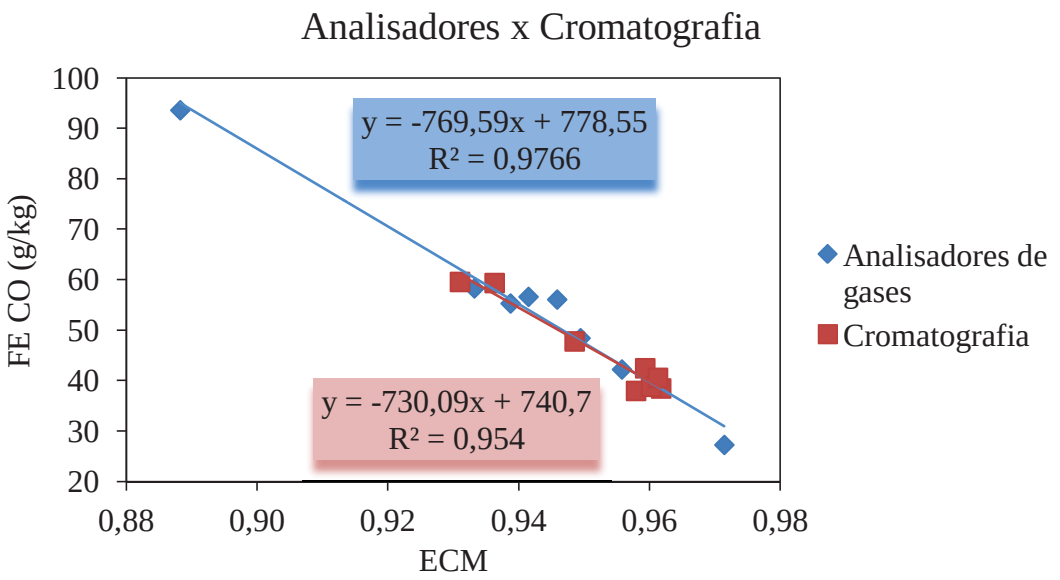


Figura 82 – Correlação entre a ECM e os FE do CO, dados pela aquisição nos analisadores de gases e por cromatografia

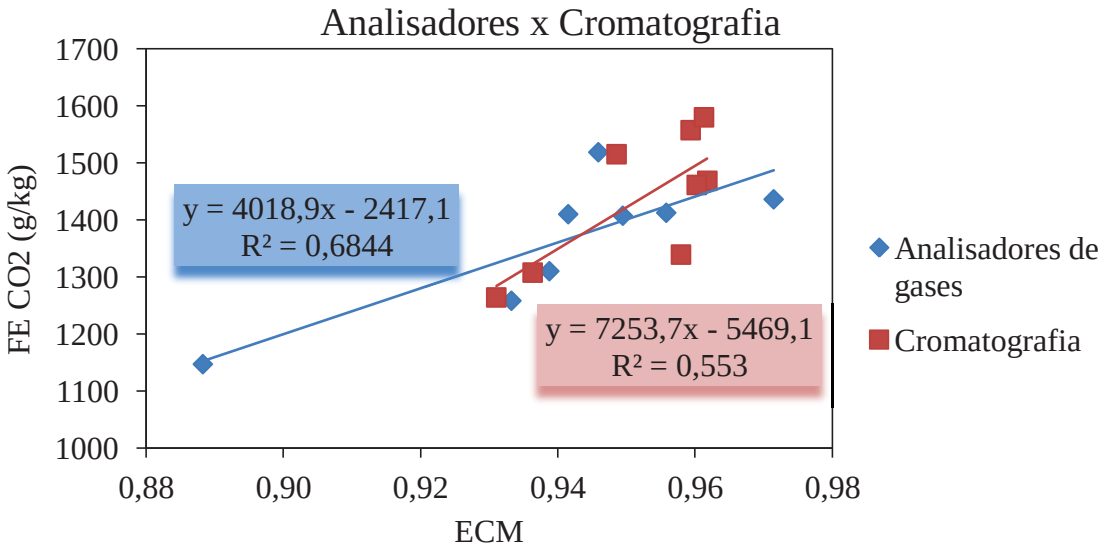


Figura 83 – Correlação entre a ECM e os FE do CO_2 dados pela aquisição nos analisadores de gases e por cromatografia

Nota-se que houve uma melhor correlação para os dados obtidos pelos analisadores de gases e por cromatografia. Tem-se também que a emissão de CO é

maior quando a eficiência de combustão modificada é menor e que ocorre o inverso com a emissão de CO_2.

Na tabela 25 é feita uma comparação entre os resultados obtidos laboratório, com os dados obtidos em campo e por Soares Neto *et al.* (2009)

Tabela 25 – Comparação de resultados

Experimento	Fatores de Emissão (g/kg)		
	FE CO_2	FE CO	FE CH_4
Laboratório (Cromatografia)	1437	46	3,2
Laboratório (Analisadores)	1363	55	-
Cruzeiro do Sul (2010)	1513	157	8,2
Alta Floresta (2004)	1615	102	8,3
(SOARES NETO, 2009)	1690	63	3,4

Comparando os resultados médios obtidos em laboratório com os obtidos em campo, nota-se que os valores obtidos para os fatores de emissão de CO_2 estão bem próximos apresentando um coeficiente de variação de 7%. Os valores obtidos para os fatores de emissão de CO estão de acordo com os dados estimados por Soares Neto (2009) em campo para a fase de chama. Essa diferença se deve ao fato de que em campo a fase de incandescência é bem maior do que as simulações realizadas em laboratório.

4.3 Análise estatística dos fatores de emissão

Além dos cálculos dos fatores de emissão e da eficiência da combustão e com o intuito de verificar qual variável em estudo (diâmetro do tronco, inclinação da bandeja e vazão do ar) mais interferiu na emissão de gases poluentes, principalmente o CO_2 e o CH_4 que contribuem para o aumento do efeito estufa, realizou-se um estudo estatístico para o cálculo dos efeitos e interações dos valores referentes ao fator de emissão e

calculou-se a estatística t (t de Student) para avaliar a significância destes efeitos e suas interações. Também foram gerados gráficos para melhor visualização destes efeitos.

4.3.1 Estudo estatístico para os fatores de emissão dos gases calculado por cromatografia

De modo análogo, calculou-se para os dados obtidos por cromatografia o efeito dos fatores e de suas interações, bem como o cálculo de sua significância. Os dados obtidos estão na tabela 26.

Tabela 26 - Teste t dos efeitos dos fatores de emissão do CO

	Efeito	Erro padrão estimado	Teste t
A	-11,098	2,323	-2,389*
B	-2,959	2,323	-0,637
C	7,902	2,323	1,701
AB	1,839	2,323	0,396
AC	-8,681	2,323	-1,869
BC	3,948	2,323	0,850
ABC	-1,062	2,323	-0,229

* $|t_{calc}| > t_{tab}$, logo a média difere significativamente a 5% de probabilidade.

Examinando a magnitude dos efeitos, observa-se que entre os fatores, o fator A (diâmetro do tronco) é o dominante, seguido da interação AC (diâmetro do tronco e vazão de ar). Porém é necessário saber o quão significante é esta magnitude. Por isso calculou-se o teste t para julgar se o efeito é significativamente diferente de zero. Os efeitos significantes são os mais importantes do experimento (MONTGOMERY, 2004). O teste t é obtido pela razão da magnitude dos efeitos/interações por seu erro-padrão estimado, o resultado é comparado com uma distribuição t (tabelada) com 8 graus de liberdade. O valor encontrado é de 2,306 com confiabilidade de 95%, assim para que o efeito/interação seja significante o módulo do valor de t encontrado deve ser maior que 2,306. Neste caso o fator A foi significante.

Nas figuras 84 e 85 onservam-se os gráficos gerados pelo suplemento *Action* do *Excel* 2007, ilustrando os efeitos e suas interações.

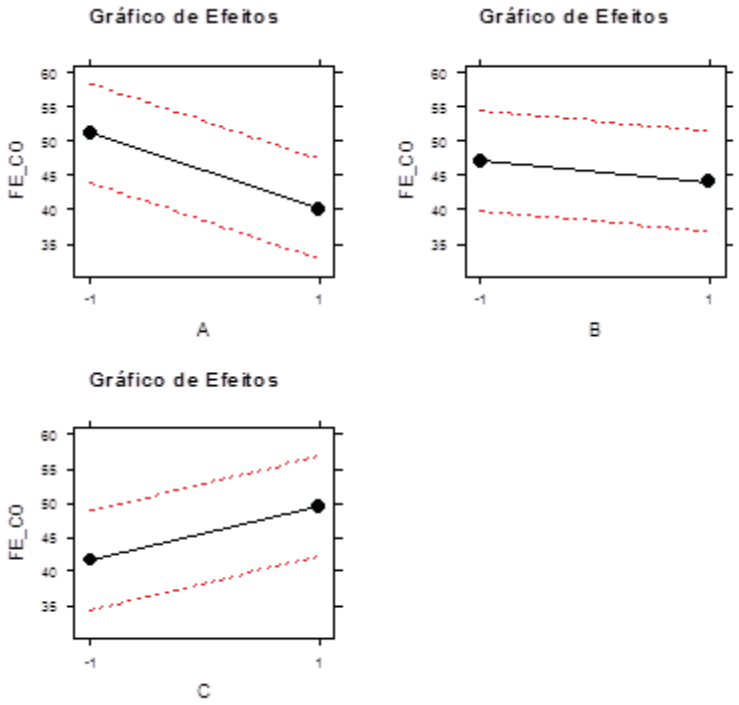


Figura 84 – Gráfico dos efeitos A, B e C em relação ao fator de emissão de CO

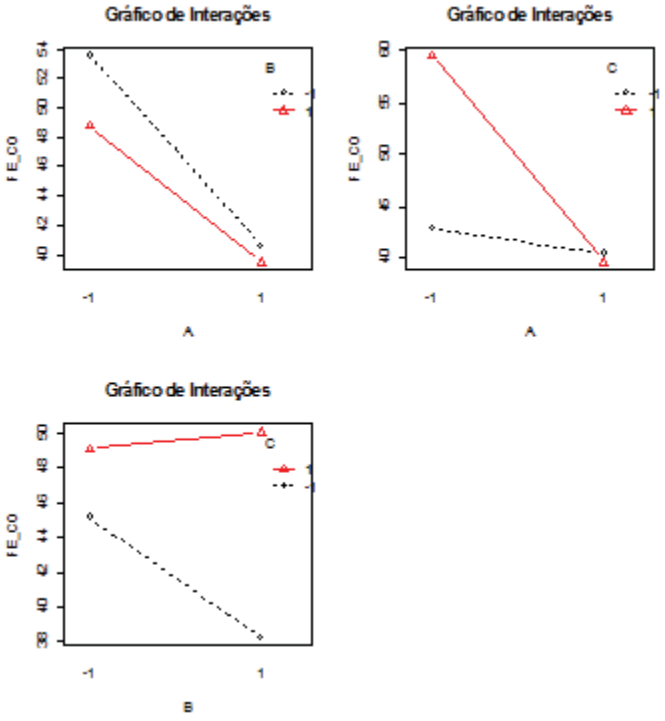


Figura 85 – Gráfico das interações em relação ao fator de emissão de CO

Apesar de também não ser significativa houve interação entre os fatores AC.

A tabela 27 apresenta os valores dos efeitos calculados para a emissão de CH_4.

Tabela 27 - Teste t dos efeitos dos fatores de emissão de CH_4

	Efeito	Erro padrão estimado	Teste t
A	-0,722	0,218	-1,657
B	-0,087	0,218	-0,201
C	0,121	0,218	0,278
AB	0,054	0,218	0,123
AC	-0,301	0,218	-0,691
BC	0,311	0,218	0,715
ABC	-0,128	0,218	-0,295

O fator A (diâmetro do tronco) possui a maior magnitude porém não foi um fator significativo. Nas figuras 86 e 87 observam-se os gráficos dos efeitos e das interações para os fatores de emissão de CH_4.

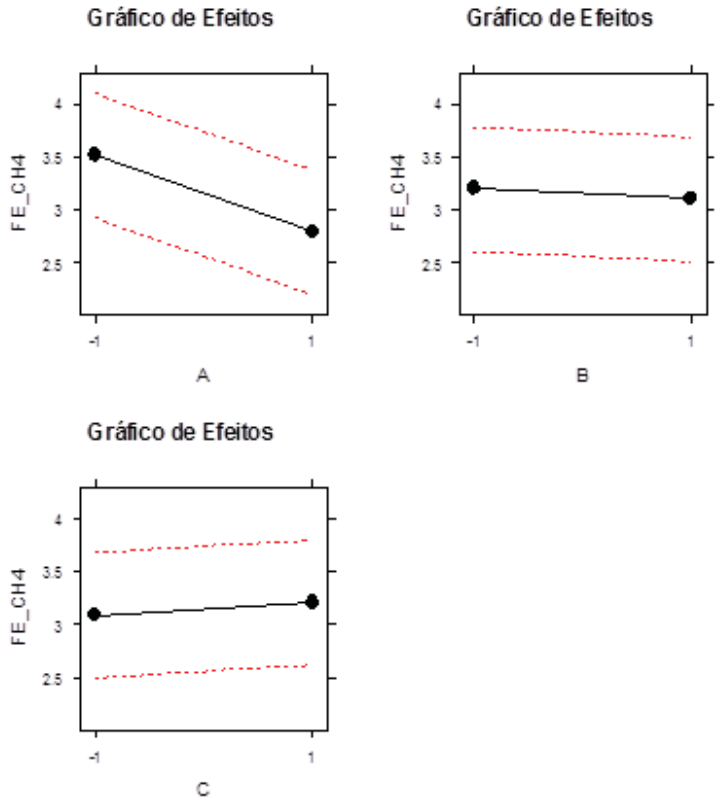


Figura 86 – Gráfico dos efeitos A, B e C em relação ao fator de emissão CH_4

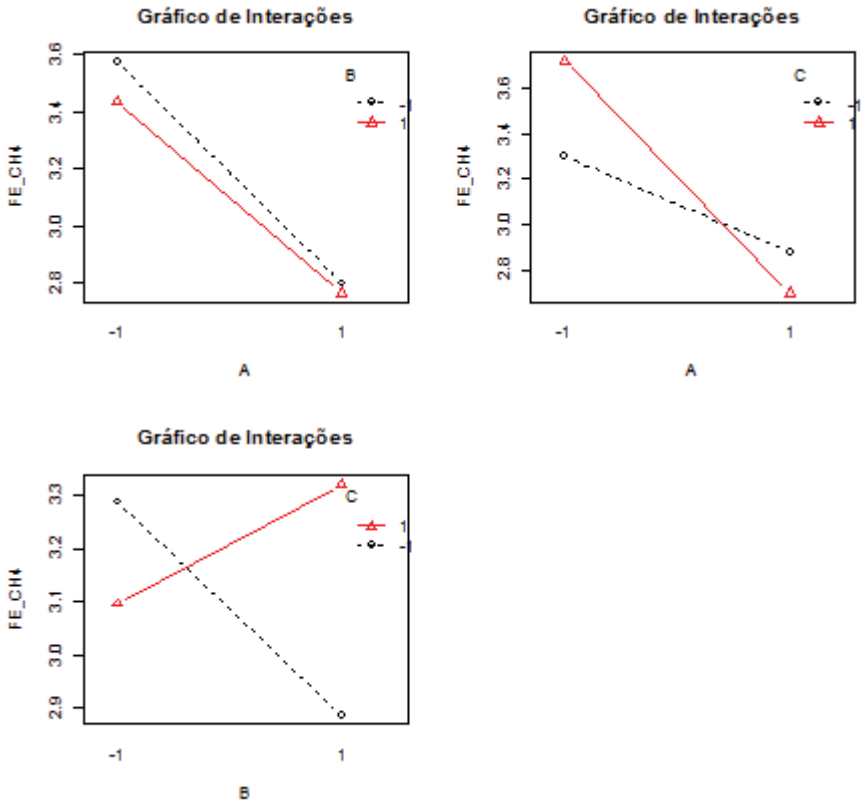


Figura 87 – Gráfico das interações em relação ao fator de emissão de CH_4

Apesar de também não ser significativa houve interação entre os fatores AC e BC.

Calculou-se também os efeitos e as interações para os fatores de emissão de CO_2. A tabela 28 apresenta os valores encontrados.

Tabela 28 - Teste t dos efeitos dos fatores de emissão de CO_2

	Efeito	Erro padrão estimado	Teste t
A	160,158	30,930	2,589*
B	-47,396	30,930	-0,766
C	-66,837	30,930	-1,080
AB	62,309	30,930	1,007
AC	74,468	30,930	1,204
BC	84,901	30,930	1,372
ABC	18,737	30,930	0,303

* $|t_{calc}| > t_{tab}$, logo a média difere significativamente a 5% de probabilidade

O fator A (diâmetro do tronco) possui a maior magnitude e o valor encontrado foi significativo, ou seja, o diâmetro do tronco interferiu no aumento do fator de emissão do CO_2.

Nas figuras 88 e 89 observam-se os gráficos dos efeitos e das interações para os fatores de emissão de CO_2.

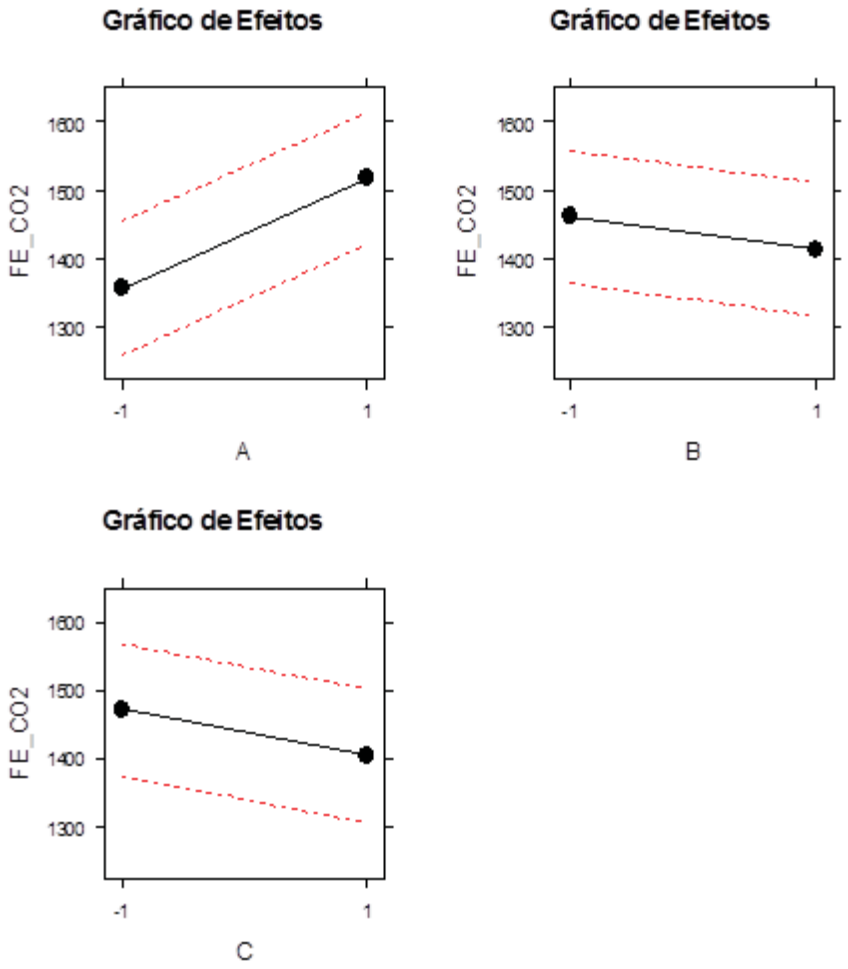


Figura 88 – Gráfico dos efeitos A, B e C em relação ao fator de emissão CO_2

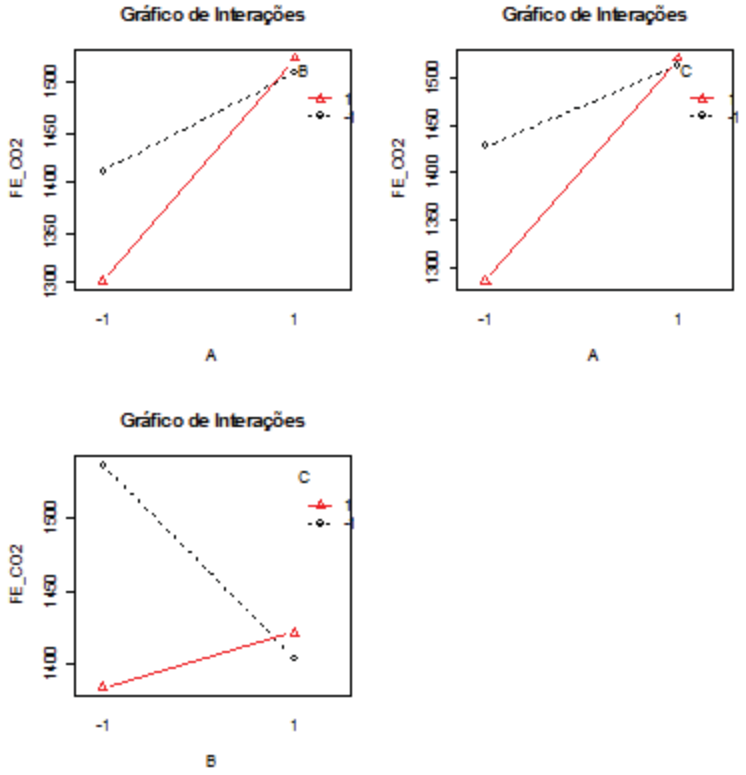


Figura 89 – Gráfico das interações em relação ao fator de emissão de CO_2

Apesar de também não ser significativa houve interação entre os fatores AB, AC e BC.

4.4 Consumo de biomassa e fatores de emissão extrapolados para uma floresta de eucalipto

A taxa média do consumo da queima de eucalipto em laboratório para os experimentos analisados por cromatografia foi de 63,2%. Nestes experimentos obtiveram-se fatores médios de emissão de CO_2, CO, CH_4 e NMHC: 1437; 46; 3,15 e 2,03 g/kg de biomassa seca, respectivamente. Wink (2009), quantificou que uma floresta de eucalipto de 20 anos produz cerca de 342 t/ha de biomassa seca total. Assumindo a eficiência de queima de 63,2%, pode-se estimar que a queima de um hectare de floresta de eucalipto com 20 anos produz cerca de 311599 kg de CO_2, 9943 kg de CO, 681 kg de CH_4 e 439 kg de NMHC.

Porém, Carvalho *et al* (2001) em uma série de experimentos de queima na região amazônica de Alta Floresta, estimou que se obtém um consumo máximo de 50%, em áreas maiores que 4 ha de floresta. Considerando-se o consumo de eucalipto no campo de 50%, estima-se que esta mesma floresta de eucalipto (20 anos) emitiria cerca de 245727 kg de CO_2, 7866 kg de CO, 537 kg de CH_4 e 347 kg de NMHC.

5 CONCLUSÕES

Para a queimada realizada em Cruzeiro do Sul obtiveram-se os seguintes fatores médios para emissão de CO_2, CO, CH_4, NMHC e $MP_{2,5}$: 1513; 157; 8,2; 3,9 e 1,9 g/kg de biomassa seca, respectivamente. Ao comparar estes resultados com os obtidos em Alta Floresta (2004) notou-se que apresentaram pouca variação, apesar de terem sido coletados por sistemas diferentes e em lugares diferentes.

Obteve-se em Cruzeiro do Sul uma eficiência de combustão (EC) de 0,928 para a fase de chama e de 0,836 para a fase de incandescência e uma eficiência de combustão modificada (ECM) de 0,946 para a fase de chama e de 0,874 para a fase de incandescência. Tais valores foram muito semelhantes aqueles obtidos em Alta Floresta.

Calculou-se que um hectare de floresta queimada produziu cerca de 232115 kg de CO_2, 24141 kg de CO, 1254 kg de CH_4, 596 kg de NMHC e 285 kg de $MP_{2,5}$. A taxa de emissão de CO_2 calculado para a floresta amazônica corresponde a 0,91% das emissões globais de gases do efeito estufa.

Extrapolando a taxa de emissão de 232115 kg de CO_2 para uma taxa média de desmatamento de 15815 km^2/ano na região amazônica, calculou-se que a emissão de CO_2 proveniente deste desmatamento e posterior queima correspondem a 0,91% das emissões globais de gases do efeito estufa.

Duas análises foram efetuadas realizando experimentos de queima de eucalipto no laboratório do LCP/INPE: uma calculada a partir dos dados dos analisadores de gases e outra por cromatografia. Para ambas as análises foram calculadas: a concentração média líquida, os fatores de emissão e a eficiência de combustão.

Obteve-se após a queima de eucalipto em laboratório e posterior análise por cromatografia os seguintes fatores médios para emissão de CO_2, CO, CH_4 e NMHC: 1437 ± 119; 46 ± 9; 3,15 ± 0,46 e 2,03 ± 0,15 g/kg de biomassa seca, respectivamente.

Foi obtida uma eficiência de combustão (EC) de 0,790 para a cromatografia e 0,749 para os analisadores de gases, e uma eficiência de combustão modificada (ECM) de 0,952 para cromatografia e 0,941 para os analisadores de gases. Os experimentos realizados nas condições *bc* (tronco maior que 2,5 cm, inclinação de 0° e vazão de 350

a 400 m^3/h) apresentaram os piores coeficientes para a eficiência da combustão. Isso se deve ao fato de serem consumidos apenas 23% da biomassa inicial.

A partir da análise estatística dos fatores de emissão observou-se que o fator que interfere na emissão de gases poluentes, principalmente do CO_2, que colabora para o aumento do efeito estufa, foi o diâmetro do tronco. A emissão de CO_2 é maior nos experimentos realizados com troncos mais finos, onde a fase de chama é mais intensa. As emissões de CO e de CH_4 são maiores nos experimentos nos quais os troncos utilizados foram maiores; estes experimentos caracterizaram-se por uma fase de chama curta e um período maior de incandescência (fase onde estes gases são emitidos em maior quantidade).

Considerando-se o consumo de eucalipto no campo de 50%, estimou-se que uma floresta de eucalipto de 20 anos (aproximadamente 342 t/ha) emitiria cerca de 245727 kg de CO_2, 7866 kg de CO, 537 kg de CH_4 e 347 kg de NMHC.

Como uma das principais contribuições deste trabalho pode-se apontar a geração de dados experimentais realizados na região amazônica em que foi possível estimar que as queimadas nesta região contribuem com apenas 0,91% das emissões globais de gases do efeito estufa (por ano). Pode-se também ressaltar que os experimentos realizados em laboratório apontaram que o diâmetro do tronco é um fator que contribui para o aumento da emissão de gases poluentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 7190: Projetos de estruturas de madeira. Rio de Janeiro, 107 p, 1997.

ALVES, B. J. R., OLIVEIRA, O. C. Cromatógrafo Perkin-Elmer GC Auto System e Integrator PE Nelson Modelo 1022 - Instruções básicas de uso em análise de redução de acetileno (ARA). DOCUMENTO Nº 82. Seropédica – RJ. ISSN 0104-6187, 1998.

ANDRADE, E. N., O eucalipto. 1ª edição. Chácaras e Quintais, 118p, 1939.

ANDREAE, M.O., MERLET, P., "Emissions of trace gases and aerosols from biomass burning", Global Biogeochemical Cycles, 15, 955-966, 2001.

ANEEL, Atlas de energia elétrica do Brasil. 2002. Disponível em http://www.aneel.gov.br/arquivos/PDF/livro_atlas.pdf. Acessado em 04 de março de 2009.

ARATANGY, G.B., Protocolo de Quioto: uma aplicação da teoria da ação coletiva. 91 f. Dissertação de Mestrado - FGV, São Paulo, 2007.

BABBITT, R.E., WARD, D.E., SUSOT, R.A., ARTAXO, P., KAUFFMAN, J.B., "A comparison of concurrent airborne and ground-based emissions generated from biomass burning in the Amazon bazin". In: SCAR-B: Smoke/Sulfate, Clouds and Radiation-Brazil: Proceedings. Transtec, São José dos Campos, SP, pp. 23–26, 1996.

BALCAZAR, J. G. C. Modelagem de ciclos combinados integrados à incineração de resíduos sólidos municipais. 2011. 190 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2011.

BARBOSA, V. 10 países que estão esquentando (e muito) o planeta. Disponível em: http://exame.abril.com.br/meio-ambiente-e-energia/noticias/10-paises-que-estao-esquentando-e-muito-o-planeta?p=7, 2011. Acesso em: 20 de agosto de 2012.

BARKER , T., BASHMAKOV, I., BERNSTEIN, L., BOGNER, J.E., BOSCH, P.R., DAVE, R., DAVIDSON, O.R., FISHER, B.S., GUPTA, S., HALSNÆS, K., HEIJ, G.J., KAHN RIBEIRO, S., KOBAYASHI, S., LEVINE, M.D., MARTINO, D.L., MASERA, O., METZ, B., MEYER, L.A., NABUURS, G.-J., NAJAM, A., NAKICENOVIC, N., ROGNER, H.-H., ROY, J., SATHAYE, J., SCHOCK, R., SHUKLA, P., SIMS, R.E.H., SMITH, P., TIRPAK, D.A., URGE-VORSATZ, D., ZHOU, D., 2007. TECHNICAL SUMMARY. IN: METZ, B., DAVIDSON, O.R., BOSCH, P.R., DAVE, R., MEYER, L.A. (EDS.), Climate Change 2007: Mitigation. Contribution of Working Group III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

BRAND, M. A., Qualidade da biomassa florestal para o uso na geração de energia em função da estocagem. 151 f. Tese de Doutorado – UFPR, Curitiba, 2007.

BRITO, J. O., BARRICHELO, L.E.G., Usos diretos e propriedades para geração de energia. IPEF: Filosofia de trabalho de uma elite de empresas florestais brasileiras, circular técnica n°52. 1979.

CARVALHO JR., J.A.; SANTOS, J.M.; SANTOS, J.C.; LEITÃO, M.M. A tropical rainforest clearing experiment by biomass burning in the Manaus region. Atmospheric Environment 29(17):2301-2309, 1995.

CARVALHO, J.A., COSTA, F.S., VERAS, C.A.G., SANDBERG, D.V., ALVARADO, E.C., GIELOW, R., SERRA, A.M., SANTOS, J.C. Biomass fire consumption and carbon release rates of rainforest-clearing experiments conducted in Northern Mato Grosso, Brazil. Journal of Geophysical Research 106 (D16), 17877–17887, 2001.

CARVALHO, J.A., MCQUAY, M. Q. Princípios de Combustão Aplicada. Editora da UFSC, 176p, 2007.

CARVALHO, J.A., VERAS, C.A.G., ALVARADO, E.C., SANDBERG, D.V., LEITE, S.J., GIELOW, R., RABELO, E.R.C., SANTOS, J.C. Under-story fire propagation and tree mortality on adjacent areas to an Amazonian deforestation fire. International Journal of Wildland Fire, 19(6), 795–799, 2010.

CEEETA, Centro de Estudos em Economia da Energia, dos Transportes e do Ambiente. Programa Nacional para as Alterações Climáticas. 1ª edição. Portugal, 2002. 75 f.

CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Agricultura e aquecimento global. São Paulo: Embrapa Monitoramento Por Satélite, 2007. Disponível em: <http://www.aquecimento.cnpm.embrapa.br/bibliografia/agr_e_aquec_Cerri_2007.pdf>. Acesso em: 13 de agosto de 2012.

CPTEC-INPE, Queimadas. Dísponível em http://pirandira.cptec.inpe.br/queimada/acervo/sats_geosat_ant.htm. Acessado em 07 de julho de 2011.

CRUTZEN, P.J., ANDREAE, M.O. "Biomass burning in the tropics: impact on atmospheric chemistry and biogeochemical cycles", Science, 250, 1669-1678, 1990.

DEL GRANDE, M., Cromatografia gasosa: princípios básicos. Disponível em: http://www.cpatc.embrapa.br/eventos/seminariodequimica/1%B0%20Minicurso%20Produ%E7%E3o%20e%20Qualidade%20de%20Biodiesel/cromatografiagasosa.pdf. 2012. Acessado em 03 de julho de 2012.

DPI, Queimadas – Monitoramento de focos. 2010. Disponível em http://www.dpi.inpe.br/proarco/bdqueimadas/. Acessado em 20 de julho de 2011.

EHSO, Introduction to Emission Factors. Environmental Health & Safety Online, 8000 Roswell Rd, Atlanta, GA 30350. Disponível em http://www.ehso.com/Air_AP_42.htm. Acessado em 14 de março de 2012.

FEREK, R.J., REID, J.S., HOBBS, P.V., 1998. Emission factors of hydrocarbons, halocarbons, trace gases and particles from biomass burning in Brazil. Journal of Geophysical Research 103 (D24), 32107–32118.

GALDAMEZ, E.V.C., Aplicação das técnicas de planejamento e análise de experimentos na melhoria de um processo de fabricação de produtos plásticos. USP/São Carlos – 2002. Dissertação de Mestrado, 133p.

GUILD, L.S., BOONE KAUFFMAN, J., COHEN, W.B., HLAVKA, C., WARD, D.E., 2004. Modeling biomass burning emissions for Amazon forest and pastures in Rondônia, Brazil. Ecological Applications 14 (4 Suppl.), S232eS246.

GUYON, P., FRANK, G.P.,WELLING, M., CHAND, D., ARTAXO, P., RIZZO, L., NISHIOKA, G., KOLLE, O., FRITSCH, H., SILVA DIAS, M.A.F., GATTI, L.V., CORDOVA, A.M., ANDREAE, M.O., 2005. Airborne measurements of trace gas and aerosol particle emissions from biomass burning in Amazonia. Atmospheric Chemistry and Physics 5, 2989e3002

INPE (INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS). Taxa de desmatamento anual. 2011. Disponível em http://www.obt.inpe.br/prodes/prodes_1988_2010.htm acesso em 12 de março de 2012.

IPAM. Perguntas e Respostas sobre Mudanças Climáticas. Belém: Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia, 2002.

ITO, A., PENNER, J.E., 2004. Global estimates of biomass burning emissions based on satellite imagery for the year 2000. Journal of Geophysical Research 109 (D14), D14S05

JUNEJA, S. C. Combustion of cellulosic materials and its retardance – status and trends. Part 1. Ignition, combustion process and trends. Wood Science, v. 7, n. 3, p. 201-208, 1975.

KAUFMAN, Y.J., SETZER, A., WARD, D., TANRE, D., HOLBEN, B.N., MENZEL, P., PEREIRA, M.C., RASMUSSEN, R., 1992. Biomass burning airborne and space borne experiment in the amazonas (BASE e A). Journal of Geophysical Research 97 (D13), 14,581e14,599.

KIRCHHOFF, V.W.J.H., Queimadas na Amazônia e efeito estufa, Ed. Contexto, 1992, 118p.

KRUPA, S.V. Global Climate Change: processes and products an overview. Environmental Monitoring and Assessment, v. 46, p. 73-88, 1997.

LEXTEC. Léxico técnico, 2012. Disponível em: http://www.instituto-camoes.pt/lextec/por/domain_1/definition/20627.html. Acessado em 13 de março de 2012.

LINDE. Cromatografia gasosa. 2008. Disponível em http://hiq.linde-gas.com.br/international/web/lg/br/like35lgspgbr.nsf/docbyalias/anal_gaschrom. Acessado em 06 de julho de 2011.

LOBERT, J.M.; SCHARFFE, D.H.; HAO, W.M.; KUHLBUSCH, T.A.; SEUWEN, R.; WARNECK, P.; CRUTZEN, P.J., 1991, Experimental evaluation of biomass burning emissions: nitrogen and carbon containing compounds. In: J. S. Levine (editor). Global Biomass Burning: Atmospheric, Climatic, and Biospheric Implications, pp 289 - 304. MIT Press.

_____, KEENE, W.C.; LOGAN, J.A.; YEVICH, R., 1999, Global chlorine emissions from biomass burning: reactive chlorine emissions inventory. J. Geophys. Res., 104, 8373-8390.

MALER, K.; VINCENT, J. R.; Handbook of environmental economics. 1st ed.Amsterdam: Boston: Elsevier, 2003. 1 v. 556p.

MARK A . COCHRANE and CHRISTOPHER P. BARBER. Climate change, human land use and future fires in the Amazon Global Change Biology (2009) 15, 601–612, doi: 10.1111/j.1365-2486.2008.01786.x

MCT, Primeiro inventário brasileiro de emissões antrópicas de gases de efeito estufa. Emissões de gases de efeito estufa da queima de biomassa no cerrado não-antrópico utilizando dados orbitais, 2006.

MCT, Efeito Estufa e a Convenção sobre Mudança do Clima, Cartilha. Brasília: 1999.

MIEVILLE, A., GRANIER, C., LIOUSSE, C., GUILLAUME, B., MOUILLOT, F., LAMARQUE, J.F., GRÉGOIRE, J.M., PÉTRON, G., 2010, “Emission of gases and particles from biomass burning during the 20th century using satellite data and a historical reconstruction”, Atmospheric Environment, 44, 1469-1477.

MITCHELL, J. F. B. The "greenhouse" effect and climate change. Reviews of Geophysic, Bracknell, v. 21, n. 1, p.115-139, fev. 1989. American Geophysical Union. Disponível em:
http://www.webpages.uidaho.edu/envs501/downloads/Mitchell%201989.pdf.
Acessado em 16 de agosto de 2012.

MONTGOMERY, D. C., RUNGER, G.C., HUBELE, N. F. Estatística Aplicada à Engenharia. 2ª edição. LTC, 335 p. Rio de Janeiro, 2004

_____, Diseño y análisis de experimentos. Traduzido por Jaime Delgado Saldivar. México, Iberoamérica, 589 p. 1991.

OLIVEIRA, R.A., SOARES NETO, T. G., Concentrações das espécies químicas liberadas durante a combustão de biomassa - Relatório do projeto de iniciação científica (PIBIC/CNPQ/INPE), 51 f. 2008.

PEREIRA, J.C.D.; STURION, J.A.; HIGA, A.R.; HIGA, R.C.V.; SHIMIZU, J.Y. Características da madeira de algumas espécies de eucalipto plantadas no Brasil. Colombo: Embrapa Florestas, 2000. 113 f. (Embrapa Florestas. Documentos, 38).

PINTO, E. M., CALIL JUNIOR, C. Estudo teórico e experimental sobre a degradação térmica e os gradientes térmicos da madeira de *Eucalyptus* de uso estrutural exposta ao fogo. Revista Minerva, São Carlos - SP, v. 3, n. 2, p. 131-140, 2006.

QUIRINO, W.F., VALE, A.T., ANDRADE, A.P.A., ABREU, V.L.S., AZEVEDO, A.C.S. Poder calorífico da madeira e de materiais lignocelulósicos. Publicado na Revista da Madeira nº 89 abril 2005 pág 100-106.

ROWELL, R. M. Chemical Modification of Wood. In:Wood and cellulosic chemistry. New York: David Hon &Nobuo Shiraishi, 1991. cap.15, p. 703-756.

SANDBERG, D.V., OTTMAR, R.G., Slash burning and fuel consumption in the Douglas-fir subregion. Presented at 7th Conference on Fire and Forest Meteorology, Fort Collins, Colorado. 1983.

SILVA, C.R., SANT'ANNA, A.P. Uma aplicação do planejamento de experimentos na indústria farmacêutica. SISTEMAS & GESTÃO, v. 2, n. 3, p. 274-284, setembro a dezembro de 2007.

SOARES NETO, T.G., CARVALHO, J.A., VERAS, C.A.G., ALVARADO, E.C., GIELOW, R., LINCOLN, E.N., CHRISTIAN, T.J., YOKELSON R.J., SANTOS J.C., Biomass consumption and CO_2, CO and main hydrocarbon gas emissions in an Amazonian forest clearing fire. Atmospheric Environment, 43, 438–446, 2009.

_____, J.A. CARVALHO JR, E.V. CORTEZ, R.G. AZEVEDO, R.A. OLIVEIRA, W.R.R. FIDALGO, J.C. SANTOS. Laboratory evaluation of Amazon forest biomass burning emissions. Atmospheric Environment 45 (2011) 7455e7461.

SUZANO, O que é o aquecimento global? 2012. Disponível em http://www.pegadadecarbonosuzano.com.br/mudancas-climaticas. Acessado em 08 de junho de 2012

TEOFILO, R. F.; FERREIRA, M. M. C., Quimiometria II: planilhas eletrônicas para cálculos de planejamentos experimentais, um tutorial. Quím. Nova, São Paulo, v. 29, n. 2, Apr. 2006. Disponível em <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0100-40422006000200026&lng=en&nrm=iso>. Acessado em 16 de março de 2012.

VASCONCELOS, E.C., Uma aplicação da metodologia projeto e análise de experimentos na construção de matrizes QFD. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Itajubá, MG, 182 f. 2004.

WARD, D.E., HARDY, C.C., 1991. "Smoke emissions from wildland fires". Environment International 17, 117–134.

WARD, D.E., SUSOTT, R.A., KAUFFMAN, J.B., BABBITT, R.E., CUMMING, D.L., DIAS, B.,HOLBEN, B.N., KAUFMAN, Y.L., RASMUSSEN, R.A., SETZER, A.W., 1992. Smoke and fire characteristics for Cerrado and deforestation burns in Brazil: Base-B experiment. Journal of Geophysical Research 97 (D13), 14,601e14,619.

WINK,C., Estoque de carbono em plantações de eucalyptus sp. implantados em campo nativo. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil. 130f. 2009.

XAVIER, M. E. R., KERR, A. S., A análise do efeito estufa em textos paradidáticos e periódicos jornalísticos. Cad. Bras. Ens. Fís., v. 21, n. 3: p. 325-349, dez 2004.

YOKELSON, R.J., KARL, T., ARTAXO, P., BLAKE, D.R., CHRISTIAN, T.J., GRIFFITH, D.H.T., GUENTHER, A., HAO, W.M. The tropical forest and fire emissions experiment:overview and airborne fire emission factor measurements. Atmospheric Chemistry and Physics 7, 5175e5196, 2007.