



Renato Cruz Neves

# **Reforma de gás de gaseificação por meio de tocha de plasma: ensaios preliminares**

90/2013

CAMPINAS  
2013



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Renato Cruz Neves

# Reforma de gás de gaseificação por meio de tocha de plasma: ensaios preliminares

Orientador: Caio Glauco Sánchez

Dissertação de mestrado apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, na Área de Térmica e de Fluidos

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO RENATO CRUZ NEVES, E ORIENTADO PELO PROF. DR. CAIO GLAUCO SÁNCHEZ

A handwritten signature in black ink, appearing to be "Caio Glauco Sánchez", written over a dotted line.

ASSINATURA DO ORIENTADOR

CAMPINAS  
2013

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

N414r Neves, Renato Cruz, 1987-  
Reforma de gás de gaseificação por meio de tocha de plasma: ensaios preliminares / Renato Cruz Neves. – Campinas, SP : [s.n.], 2013.

Orientador: Caio Glauco Sánchez.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Biomassa - Gaseificação. 2. Biomassa - Aproveitamento energético. 3. Gaseificação. 4. Alcatrão. 5. Plasma (Gases ionizados). 6. Tochas de plasma. I. Sánchez, Caio Glauco, 1955-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Reformation of gasification gas by plasma torch: preliminary results

**Palavras-chave em inglês:**

Biomass gasification

Biomass - utilization energetic

Gasification

Tar

Plasma (ionized gases)

Plasma torches

**Área de concentração:** Térmica e Fluídos

**Titulação:** Mestre em Engenharia Mecânica

**Banca examinadora:**

Caio Glauco Sánchez [Orientador]

Juan Miguel Mesa Perez

Osvair Vidal Trevisan

**Data de defesa:** 26-08-2013

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Mecânica

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA TÉRMICA E DE FLUIDOS**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO ACADÊMICO**

**Reforma de gás de gaseificação por meio  
de tocha de plasma: ensaios preliminares**

Autor: Renato Cruz Neves

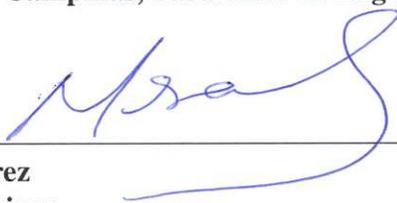
Orientador: Caio Glauco Sánchez

A Banca Examinadora composta pelos membros abaixo aprovou esta Dissertação:



---

**Prof. Dr. Caio Glauco Sánchez, Presidente**  
**Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia mecânica**



---

**Dr. Juan Miguel Mesa Perez**  
**Bioware tecnologia, Campinas**



---

**Prof. Dr. Osvair Vidal Trevisan**  
**Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia mecânica**

Campinas, 26 de agosto de 2013.

## **Dedicatória**

Dedico este trabalho aos meus pais, Leonardo e Joana, ao meu irmão Gabriel e a Deus por ter me dado saúde e alegria de tê-los.

## Agradecimentos

A Deus e as pessoas mais importantes de minha vida: Joana, Leonardo e Gabriel.

Aos meus pais, Joana e Leonardo, pois se cheguei até aqui, foi por causa deles. Pelo amor incondicional, pelas palavras de sabedorias nas horas de angústias, pela fé imensurável que tudo daria certo e pelo mundo perdido deles para ganhar o meu;

Ao meu irmão Gabriel pela curiosidade científica, pela força e que tudo dará certo no final;

A pessoa inabalável que me assegurou em todos os momentos: Carina. Pela sua inteligência, alegria, amor e nosso crescimento inquestionável;

Amo vocês.

Este trabalho não poderia ser finalizado sem a ajuda e conselhos preciosos de algumas pessoas e entidades a quem deixo a minha singela homenagem:

Ao Professor Doutor Caio Glauco Sánchez. Primeiramente, pela oportunidade e, em segundo lugar, pela imensurável paciência e exemplo de sabedoria;

A CAPES, pelo auxílio financeiro;

Ao técnico Luiz Zanaga, pela imensa experiência concedida, pois "se não der certo, pinte de verde e jogue no mato";

Ao mestrando João, pelos dois anos de aprendizado;

Ao doutorando Danilo, pela experiência vivida e refeições na universidade;

Ao doutorando Eugênio, pela calma e dinamismo;

As minhas avós (e avôs em memória) pela fé depositada em mim;

Aos meus amigos Guilherme Merighi, Maurício e Marcos;

Ao meus colegas da moradia;

A todas as pessoas com quem compartilhei minha vida e me ajudaram a crescer: Arieli, Ricardo, Adriel, meus padrinhos Cida e Nélson, meus amigos Guilherme Sestito, Marcelo, Leonardo, Marcos, Luiz Anoni, Eva, Renata e Luiz;

A todos os professores, amigos e colegas não citados que ajudaram, cresceram comigo e alegraram a minha vida durante este período de trabalho árduo.

*Cada sonho que você deixa para trás, é um  
pedaço do seu futuro que deixa de existir.*

---

Steve Jobs

## Resumo

NEVES, Renato Cruz. Reforma de gás de gaseificação por meio de tocha de plasma: ensaios preliminares. 2013. 144p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

O desafio da tecnologia de reforma de gás de gaseificação é realizar a conversão de alcatrão e particulados em um gás, pois estes contaminantes podem trazer diversos problemas ao sistema de gaseificação como entupimento de filtros e corrosão. Dentre os equipamentos e métodos para a reforma do gás de gaseificação, encontra-se o plasma. Neste trabalho foi projetado, construído e ensaiado um sistema de reforma de gás de gaseificação proveniente de um reator de gaseificação utilizando a tocha de plasma. O sistema de reforma a plasma é constituído pela tocha de plasma inserida na garganta de um tubo convergente-divergente instalado na tubulação de saída do reator de gaseificação. A fonte de alimentação da tocha de plasma é o modelo Powermax1250 e a tocha é o modelo T80M, ambos da marca Hypertherm. A tocha de plasma utiliza nitrogênio como gás de trabalho, opera com pressão de 4,0 *bar* no modo arco elétrico com corrente contínua, plasma térmico, não-transferido e alcança temperaturas superiores a 1673 *K* em distâncias menores que 30 *mm*. Na gaseificação foi utilizada a serragem de Peroba e Garapeira, fator de ar de 0,22, velocidade de fluidização de 0,57  $m.s^{-1}$  e utilizou-se 550 *mm* de altura do leito fixo de areia quartzosa. A coleta de alcatrão e particulado foi adaptada da norma CEN/BT/TF 143 ("Biomass gasification - Tar and particules in product gases - sampling and analysis"). Nas condições estudadas e analisadas deste trabalho, o valor obtido para a vazão mássica de alcatrão e material particulado foi de  $(5,26 \pm 0,58)10^{-3} g.s^{-1}$  para a gaseificação convencional enquanto que para a gaseificação utilizando a tecnologia da reforma de plasma foi de  $(3,97 \pm 0,14)10^{-3} g.s^{-1}$ , que representou uma redução de 24,52 %.

*Palavras-chave:* Gaseificação de biomassa, Reforma de gás, Alcatrão, Material particulado, Tocha de plasma.

## Abstract

NEVES, Renato Cruz. Reformation of gasification gas by plasma torch: preliminary results. 2013. 144p. Dissertação (Mestrado). Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

The technologic challenge on reformation of gasification gas is to convert tar and particulate matter into gas, because they can cause various problems on gasification system as corrosion and filters clogging. Among the equipment and methods for gasification gas reformation, it is used the plasma. In this work was designed, built and tested a system for gasification gas reformation from a gasification reactor using a plasma torch. The plasma system is formed by plasma torch inserted in the throat of a convergent-divergent tube installed in the outlet pipe of the gasification reactor. The power supply of the plasma torch is Powermax1250 and the model T80M plasma torch, both from Hypertherm brand. The plasma torch uses nitrogen as working gas, operates at a pressure of 4,0 *bar* with arc current mode, thermal plasma, non-transferred and reaches temperatures above 1673 *K* in distances of less than 30 *mm*. In the gasification was used Peroba and Garapeira sawdust, air factor 0.22, fluidization velocity of 0,57  $m.s^{-1}$  and 550 *mm* height fixed bed of quartz sand. The tar and particulate collection was adapted from CEN/BT/TF 143 (Biomass gasification - tar and particules in product gases - sampling and analysis). Under the conditions studied and analyzed in this work, the value obtained for the mass flow of tar and particulate material was  $(5.26 \pm 0,58)10^{-3} g.s^{-1}$  for conventional gasification while for using the reformation of gasification gas was  $(3.97 \pm 0.14)10^{-3} g.s^{-1}$ , which represented a reduction of 24.52 %.

*Keywords:* Biomass gasification, Gas reformation, Tar, Particulate matter, Plasma torch.

## Lista de Ilustrações

2.1	Desenho esquemático de um gaseificador de leito fluidizado. . . . .	9
2.2	Gás gerado e aplicação do gás pobre e gás de síntese, (adaptado de Boerrigter e Rauch, 2005). . . . .	11
2.3	Mercado de gás de síntese mundial no ano de 2004 e estimativa para 2040, (adaptado de van der Drift et al. 2004). . . . .	12
2.4	Composição típica do alcatrão obtido pela gaseificação de biomassa, (adaptado de Coll et al., 2004) (a: hidrocarboneto com quatro anéis aromáticos; bb: hidrocarboneto com três anéis aromáticos; c: compostos fenólicos; d: hidrocarbonetos com dois anéis aromáticos; e: compostos heterocíclicos; f: Naftaleno; g: hidrocarboneto com um anel aromático; h: tolueno; i: outros). . . . .	15
2.5	Teor de alcatrão produzido em gaseificador de leito fluidizado em função da temperatura, (adaptado de Baker et al. 1988). . . . .	16
2.6	Classificação do plasma não-térmico em função da temperatura e pressão onde $T_e$ é a temperatura dos elétrons e $T_g$ do gás de plasma, (adaptado de Roth, 1995). . . . .	20
2.7	Distribuição da temperatura [ $K$ ] em cores a partir do bocal da tocha em uma câmara (de 50 por 150 $mm$ ), (adaptado de Alves et al., 2009). . . . .	23
2.8	Tocha de arco não-transferido e transferido. . . . .	24
2.9	Eficiência de coleta de particulados para alguns equipamentos de limpeza de gás adaptado de Thambimuthu (1993). . . . .	28
3.1	Câmara de análise convectiva. . . . .	36
3.2	Diagrama de coleta de temperatura em função da distância a partir do bocal da tocha. . . . .	37
3.3	Gradiente de temperatura do plasma. . . . .	37
3.4	Tubo convergente-divergente utilizado como volume de controle para os cálculos do balanço de massa e balanço de entalpia. . . . .	39
4.1	Cromatógrafo CG tipo 90. . . . .	54
4.2	Sistema de coleta de alcatrão e particulado. . . . .	58
4.3	Impinger. . . . .	59
4.4	Esquema do sistema de gaseificação de leito fluidizado. . . . .	62
4.5	Dimensões da tocha de plasma T80M. . . . .	63
4.6	Dimensões e visão isométrica da fonte de alimentação Powermax1250. . . . .	64

4.7	Vista frontal e posterior da fonte de alimentação Powermax1250. . . . .	65
4.8	Esquema da montagem dos consumíveis para goivagem no bocal da tocha. Da esquerda para a direita: bocal de proteção, bocal de retenção, bico, eletrodo, distribuidor de gás e bocal de acoplamento na tocha. . . . .	65
4.9	Dimensões do tubo convergente-divergente com corte longitudinal . . . . .	66
4.10	Dimensões do tubo convergente-divergente com corte seccional . . . . .	67
4.11	Tubo convergente-divergente. . . . .	67
4.12	Tocha de plasma em funcionamento dentro do tubo. . . . .	68
4.13	Tubo instalado e tocha de plasma inserida na garganta. . . . .	68
4.14	Volume de controle para o balanço de nitrogênio. . . . .	69
4.15	Definição do valor crítico $z_{\alpha}$ . . . . .	76
4.16	Definição do valor crítico $z_{\frac{\alpha}{2}}$ . . . . .	77
5.1	Curva granulométrica da biomassa. . . . .	79
5.2	Foto da mistura de Peroba e Garapeira. . . . .	80
5.3	Curva granulométrica do material inerte. . . . .	82
5.4	Material inerte para ensaios. . . . .	82
5.5	Curva de calibração da vazão mássica de biomassa . . . . .	84
5.6	Curva de elevação de temperatura, ensaio e resfriamento da gaseificação convencional. . . . .	91
5.7	Curva de elevação de temperatura, ensaio e resfriamento da gaseificação com reforma a plasma. . . . .	92
5.8	Gás de gaseificação dentro dos impingers. . . . .	95
5.9	Mangueira de conexão da sonda à vidraria utilizada. . . . .	95
5.10	Filtro após a vidraria utilizado. . . . .	96
5.11	Alcatrão coletado diluído em álcool isopropílico. . . . .	96
5.12	Consumíveis novos. . . . .	97
5.13	Consumíveis utilizados. . . . .	97
B.1	Esquema da bomba calorimétrica. . . . .	122
B.2	Foto da bomba calorimétrica. . . . .	122
C.1	Canais. . . . .	123
C.2	Detalhes. . . . .	124
C.3	Cromatograma. . . . .	125
C.4	Cromatograma final. . . . .	126
C.5	Valores do cromatograma. . . . .	126
C.6	Calibração total. . . . .	127

C.7	Calibração unitária. . . . .	127
C.8	Detalhes dos componentes analisados. . . . .	128
D.1	Sonda isocinética instalado no tubo de passagem do gás de gaseificação em que $v_n$ é a velocidade do bocal ("nozzle"), $v_s$ é a velocidade do gás de gaseificação ("sample"), $R$ é o raio interno do cotovelo e $\phi$ é o diâmetro interno da sonda. . . . .	130
F.1	Ensaio 1 - Curva de aquecimento e gaseificação convencional completa. . . . .	139
F.2	Ensaio 1 - Regime de gaseificação convencional . . . . .	139
F.3	Ensaio 2 - Curva de aquecimento e gaseificação convencional completa. . . . .	140
F.4	Ensaio 2 - Regime de gaseificação convencional. . . . .	140
F.5	Ensaio 3 - Curva de aquecimento e gaseificação convencional completa. . . . .	141
F.6	Ensaio 3 - Regime de gaseificação convencional. . . . .	141
F.7	Ensaio 1 - Curva de aquecimento e gaseificação com reforma de gás a plasma completa. . . . .	142
F.8	Ensaio 1 - Regime de gaseificação com reforma de gás a plasma. . . . .	142
F.9	Ensaio 2 - Curva de aquecimento e gaseificação com reforma de gás a plasma completa. . . . .	143
F.10	Ensaio 2 - Regime de gaseificação com reforma de gás a plasma. . . . .	143
F.11	Ensaio 3 - Curva de aquecimento e gaseificação com reforma de gás a plasma completa. . . . .	144
F.12	Ensaio 3 - Regime de gaseificação com reforma de gás a plasma. . . . .	144

## Lista de Tabelas

2.1	Reações heterogêneas e homogêneas, (adaptada de Pellegrino, 2006). . . . .	6
2.2	Classificação dos gaseificadores, (adaptada de Behainne, 1999). . . . .	7
2.3	Composição típica do gás pobre, (adaptado de Andrade, 2007). . . . .	11
2.4	Características desejáveis de gás de gaseificação para produção de alguns combustíveis, (adaptado de Ciferno e Marano, 2002 e Zuberbühler, 2006). . . . .	13
2.5	Contaminantes do gás de gaseificação, (adaptado de Gray, Tomlinson e Berger, 1996). . . . .	14
2.6	Valor típico de contaminante e qualidade do gás para geração de potência. (i) Hasler e Nussbaumer (1999); (ii) Tao (2010); (iii) Kaltschmitt e Hartmann (2001). . . . .	17
2.7	Parâmetros típicos de plasma gerados por descargas elétricas, (adaptado de Maciel, 2007). . . . .	19
2.8	Redução de particulados e alcatrão em equipamentos convencionais de limpeza. Nota: (i) Hasler e Nussbaumer (1999); (ii) Cortéz e Gil (2007); (iii) Reijnen e Brakel (1984); (iv) Hasler e Nussbaumer (2000); (v) Kumar, Jones e Hanna (2009); (vi) Hasler, Nussbaumer e Buehler (1997); (vii) Teixeira, Primo e Lora (2008); (viii) Bologna et al. (2008); (ix) Moreira e Andersen (2011); (x) Ham e Kim (2008); (xi) Laurence e Ashenafi (2012). . . . .	29
2.9	Reações de decomposição térmica do alcatrão. $C_nH_y$ representa um hidrocarboneto com cadeia maior que $C_mH_x$ onde p, q e x são números molares, (adaptado de Devi, Ptasiński e Janssen, 2005). . . . .	30
2.10	Eficiência de conversão de hidrocarbonetos pesados em leves de acordo com o gás de trabalho utilizado. . . . .	32
2.11	Tipo de gás tratado pela reformador a plasma, (adaptado de Chang, 2003). VOCs são os compostos orgânicos voláteis, PFCs são compostos perfluorados, ODS são substâncias que destroem o ozônio, (i) plasma não-térmicos, (ii) plasmas térmicos e (iii) destruição de gases. . . . .	33
3.1	Perda de massa dos consumíveis . . . . .	38
3.2	Entalpia do gás de plasma . . . . .	39
3.3	Vazão mássica do gás de gaseificação . . . . .	40
3.4	Vazão mássica do plasma . . . . .	40
3.5	Variação de entalpia do plasma. . . . .	41

3.6	Variação de entalpia de gaseificação. . . . .	42
3.7	Calor específico de reforma. . . . .	43
3.8	Cálculo da temperatura de reforma de gás de gaseificação em função da vazão do gás de gaseificação e razão $\frac{H_2}{CO}$ . . . . .	44
3.9	Concentração molar e viscosidade dos componentes do gás de gaseificação. . . . .	45
3.10	Propriedades do escoamento para o gás de gaseificação. . . . .	46
3.11	Concentrações molares, viscosidades e densidades dos componentes do gás reformado. . . . .	46
3.12	Propriedades do escoamento na garganta do tubo convergente-divergente. . . . .	47
3.13	Propriedades do escoamento para a reforma do gás de gaseificação . . . . .	48
4.1	Normas ASTM para realização de análise imediata . . . . .	52
4.2	Normas ASTM para realização de análise imediata . . . . .	54
4.3	Consumíveis utilizados . . . . .	65
5.1	Análise imediata da mistura de Peroba e Garapeira. Nota: <i>b.u.</i> representa a amostra em base úmida enquanto que <i>b.s.</i> a amostra na base seca . . . . .	80
5.2	Análise elementar da mistura de Peroba e Garapeira em que (i) é o valor determinado por diferença considerando cinzas da análise imediata. . . . .	81
5.3	Composição volumétrica dos componentes no gás de gaseificação convencional. . . . .	86
5.4	Composição volumétrica dos componentes no gás de gaseificação com reforma a plasma. . . . .	86
5.5	Composição volumétrica dos componentes no gás de gaseificação convencional isenta de nitrogênio. . . . .	87
5.6	Composição volumétrica dos componentes no gás de gaseificação com reforma a plasma isenta de nitrogênio. . . . .	87
5.7	Vazão específica de gás de gaseificação referente a vazão de combustível para a gaseificação convencional. . . . .	89
5.8	Vazão específica de gás de gaseificação reformado referente a vazão de combustível. . . . .	90
5.9	Vazão mássica de alcatrão e material particulado coletados nos ensaio de gaseificação convencional. . . . .	94
5.10	Vazão mássica de alcatrão e material particulado coletados nos ensaio de gaseificação com reforma a plasma. . . . .	94
5.11	Concentração de alcatrão e material particulado coletados nos ensaio de gaseificação convencional. . . . .	99
5.12	Concentração de alcatrão e material particulado coletados nos ensaio de gaseificação com reforma a plasma. . . . .	99

5.13	Balço de nitrogênio para a gaseificação convencional . . . . .	100
5.14	Balço de nitrogênio para a gaseificação com reforma de gás de gaseificação a plasma . . . . .	101
A.1	Normas ASTM para realização de análise imediata . . . . .	115
D.1	Normas utilizadas para o documento de análise de alcatrão e particulado . . . . .	129
D.2	Dados de projeto para diâmetro interno da sonda isocinética . . . . .	131
E.1	Roteiro básico de operação do gaseificador - Roteiro 1-6 . . . . .	133
E.1	Roteiro básico de operação do gaseificador - Roteiro 7 . . . . .	134
E.1	Roteiro básico de operação do gaseificador - Roteiro 8 . . . . .	135
E.1	Roteiro básico de operação do gaseificador - Roteiro 9-10 . . . . .	136
E.1	Roteiro básico de operação do gaseificador - Roteiro 11-12 . . . . .	137
E.1	Roteiro básico de operação do gaseificador - Roteiro 13-15 . . . . .	138

## Lista de Abreviaturas e Siglas

### *Letras Latinas*

$\%_{\text{cinzas}}$	Percentual de cinzas na amostra	
$\%_{\text{sólidos}}$	Percentual de sólidos na amostra	
$\%_{\text{umidade}}$	Percentual de umidade na amostra	
$\%_{\text{voláteis}}$	Percentual de umidade na amostra	
$\bar{d}$	Desvio médio	
$\bar{x}$	Média aritmética	
$\bar{x}_v$	Valor médio verdadeiro	
$\dot{m}_c$	Vazão mássica de combustível	$[kg.s^{-1}]$
$\dot{m}_g$	Vazão mássica do gás de gaseificação	$[kg.s^{-1}]$
$\dot{m}_p$	Vazão mássica de reforma de gás	$[kg.s^{-1}]$
$\dot{m}_p$	Vazão mássica do plasma	$[kg.s^{-1}]$
$\dot{V}_{ar}$	Vazão de ar	$[m^3.s^{-1}]$
$\dot{V}_g$	Vazão volumétrica no gás de gaseificação	$[Nm^3.h^{-1}]$
$\dot{V}_p$	Vazão volumétrica do plasma	$[Nm^3.h^{-1}]$
$A_1$	Área do tubo convergente-divergente	$[m^{-2}]$
$A_2$	Área da garganta do tubo convergente-divergente	$[m^{-2}]$
$Ar$	Número de Arrhenius	
$AP_{N_2}$	Vazão mássica de nitrogênio no alcatrão e material particulado	$[kg.s^{-1}]$
$APr_{N_2}$	Vazão mássica de nitrogênio no no alcatrão e material particulado para a gaseificação com reforma de gás a plasma	$[kg.s^{-1}]$
$Ar_{N_2}$	Vazão mássica de nitrogênio no ar	$[kg.s^{-1}]$
$B_{N_2}$	Vazão mássica de nitrogênio na biomassa	$[kg.s^{-1}]$
$C$	Teor de carbono	$[\%]$
$C_{CH_4}$	Concentração de metano	$[\%]$
$C_{CO_2}$	Concentração de dióxido de carbono	$[\%]$
$C_{CO}$	Concentração de monóxido de carbono	$[\%]$

$C_{H_2}$	Concentração de hidrogênio	[%]
$C_{N_2}$	Concentração de nitrogênio	[%]
$C_{O_2}$	Concentração de oxigênio	[%]
$C_{p,CH_4}$	Calor específico do metano	$[kJ.(kg.K)^{-1}]$
$C_{p,CO_2}$	Calor específico do dióxido de carbono	$[kJ.(kg.K)^{-1}]$
$C_{p,CO}$	Calor específico do monóxido	$[kJ.(kg.K)^{-1}]$
$C_{p,H_2}$	Calor específico do hidrogênio	$[kJ.(kg.K)^{-1}]$
$C_{p,N_2}$	Calor específico do nitrogênio	$[kJ.(kg.K)^{-1}]$
$C_{p,O_2}$	Calor específico do oxigênio	$[kJ.(kg.K)^{-1}]$
$C_{p,r}$	Calor específico de reforma	$[kJ.(kg.K)^{-1}]$
$d$	Diâmetro do tubo	[m]
$d_i$	Desvio da medida $i$	
$d_{p,m}$	Diâmetro médio das partículas retidas entre uma peneira e sua subse- quente	[mm]
$d_p$	Diâmetro médio da partícula	[m]
$E$	Voltagem	[V]
$FA$	Fator de ar	
$g$	Gravidade local	$[m.s^{-2}]$
$G_{N_2}$	Vazão mássica de nitrogênio na gaseificação convencional	$[kg.s^{-1}]$
$Gr_{N_2}$	Vazão mássica de nitrogênio na gaseificação com reforma de gás a plasma	$[kg.s^{-1}]$
$h_1$	Altura equivalente na garganta do tubo convergente-divergente	[m]
$h_1$	Altura equivalente no tubo convergente-divergente	[m]
$H$	Teor de hidrogênio	[%]
$H_{Cu}$	Calor de vaporização do cobre no consumível (eletrodo)	$[kJ.(kg)^{-1}]$
$H_g$	Entalpia do plasma	$[kJ.(kg)^{-1}]$
$H_{in}$	Entalpia de entrada do gás de trabalho	$[kJ.(kg)^{-1}]$
$I$	Corrente	[A]
$L$	Altura do leito fixo	[m]
$M_{Cu}$	Taxa de perda de massa do cobre no consumível	$[kg.s^{-1}]$
$m_l$	Massa do leito levemente empacotado	[kg]
$N$	Teor de nitrogênio na biomassa	[%]
$N_{ar}$	Teor de nitrogênio no ar	[%]
$N_g$	Teor de nitrogênio no gás de gaseificação	[%]
$O$	Teor de oxigênio	[%]

$P_1$	Pressão no tubo	[Pa]
$P_2$	Pressão na garganta do tubo convergente-divergente	[Pa]
$P_{N_2}$	Vazão mássica de nitrogênio no plasma	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$R^2$	Coefficiente de determinação ajustado	
$Re$	Número de Reynolds	
$Re_r$	Número de Reynolds de reforma	
$S$	Teor de enxofre	[%]
$T_{amb}$	Temperatura ambiente	[K]
$T_g$	Temperatura do gás de gaseificação	[K]
$T_p$	Temperatura do plasma	[K]
$T_r$	Temperatura de reforma	[K]
$U$	Velocidade superficial do agente fluidizante	[m.s <sup>-1</sup> ]
$U_{mf}$	Velocidade de mínima fluidização	[m.s <sup>-1</sup> ]
$U_t$	Velocidade terminal	[m.s <sup>-1</sup> ]
$v$	Velocidade do fluido	[m.s <sup>-1</sup> ]
$v_1$	Velocidade do gás no tubo	[m.s <sup>-1</sup> ]
$v_2$	Velocidade do gás na garganta do tubo convergente-divergente	[m.s <sup>-1</sup> ]
$V_{ar}$	Volume de ar empregado na gaseificação em relação ao consumo de combustível	[Nm <sup>3</sup> .(kg) <sup>-1</sup> ]
$V_{eg}$	Vazão específica de gás referente a vazão de combustível	[Nm <sup>3</sup> .(kg) <sup>-1</sup> ]
$V_{egr}$	Vazão específica de gás reformado	[Nm <sup>3</sup> .(kg) <sup>-1</sup> ]
$V_l$	Volume do leito levemente empacotado	[m <sup>3</sup> ]
$VA$	Volume de ar estequiométrico em relação ao consumo de combustível	[Nm <sup>3</sup> .(kg) <sup>-1</sup> ]
$VA_{ext}$	Volume de ar necessário para combustão completa	[Nm <sup>3</sup> ]
$W_g$	Vazão mássica do gás de trabalho	[kg.s <sup>-1</sup> ]
$x_i$	Medida i	
$x_p$	Fração mássica das partículas com diâmetro médio igual a $d_{p,m}$ e $d_p$	

### **Letras Gregas**

$\alpha$	Significância	
$\beta_c$	Balanco de nitrogênio para a gaseificação convencional	
$\beta_r$	Balanco de nitrogênio para a reforma do gás de gaseificação a plasma	
$\Delta h$	Diferença manométrica	[mmca]
$\Delta H_{CH_4}$	Variação de entalpia do metano	[kJ.h <sup>-1</sup> ]

$\Delta H_{CO_2}$	Varição de entalpia do dióxido de carbono	$[kJ.h^{-1}]$
$\Delta H_{CO}$	Varição de entalpia do monóxido de carbono	$[kJ.h^{-1}]$
$\Delta H_g$	Varição de entalpia do gás de gaseificação	$[kJ.h^{-1}]$
$\Delta H_{H_2}$	Varição de entalpia do hidrogênio	$[kJ.h^{-1}]$
$\Delta H_{N_2}$	Varição de entalpia do nitrogênio	$[kJ.h^{-1}]$
$\Delta H_{O_2}$	Varição de entalpia do oxigênio	$[kJ.h^{-1}]$
$\Delta H_p$	Varição de entalpia no plasma	$[kJ.h^{-1}]$
$\Delta H_r$	Varição de entalpia na reforma	$[kJ.h^{-1}]$
$\Delta P$	Perda de carga no leito	$[Pa]$
$\mu$	Viscosidade dinâmica do gás	$[Pas]$
$\mu_a$	Viscosidade dinâmica do agente fluidizante	$[Pas]$
$\mu_{CH_4}$	Viscosidade do metano	$[Pas]$
$\mu_{CO_2}$	Viscosidade do dióxido de carbono	$[Pas]$
$\mu_{CO}$	Viscosidade do monóxido de carbono	$[Pas]$
$\mu_{gs,r}$	Viscosidade dinâmica do gás reformado	$[Pas]$
$\mu_{gs}$	Viscosidade do gás de gaseificação convencional	$[Pas]$
$\mu_{H_2}$	Viscosidade do hidrogênio	$[Pas]$
$\mu_{N_2}$	Viscosidade do nitrogênio	$[Pas]$
$\mu_{O_2}$	Viscosidade do oxigênio	$[Pas]$
$\phi$	Diâmetro	
$\rho$	Densidade do fluido a temperatura de trabalho	$[kg.m^{-3}]$
$\rho_1$	Densidade no tubo	$[kg.m^{-3}]$
$\rho_2$	Densidade na garganta do tubo convergente-divergente	$[kg.m^{-3}]$
$\rho_a$	Densidade aparente	$[kg.m^{-3}]$
$\rho_g$	Densidade do gás de gaseificação	$[kg.m^{-3}]$
$\rho_g$	Densidade do gás fluidizante	$[kg.m^{-3}]$
$\rho_{gs,r}$	Densidade do gás reformado	$[kg.m^{-3}]$
$\rho_{gs}$	Densidade do gás	$[kg.m^{-3}]$
$\rho_{gr}$	Densidade a granel	$[kg.m^{-3}]$
$\rho_{N_2}$	Densidade do nitrogênio no ar	$[kg.m^{-3}]$
$\rho_p$	Densidade do gás de trabalho	$[kg.m^{-3}]$
$\sigma$	Desvio padrão	
$\sigma^2$	Variância	
$\sigma_v^2$	Variância associada	
$\sigma_m$	Desvio padrão na média	

$\varepsilon_f$	Porosidade do leito fixo
$\varepsilon_{mf}$	Porosidade do material inerte na condição de mínima fluidização

---

### ***Abreviações***

<i>b.s.</i>	Base seca
<i>b.u.</i>	Base úmida
<i>C/H</i>	Razão entre carbono e hidrogênio
<i>H<sub>2</sub>/CO</i>	Razão entre hidrogênio e monóxido de carbono
<i>PCI</i>	Poder calorífico inferior
<i>PCS</i>	Poder calorífico superior
<i>ppm</i>	Partes por milhão
<i>rpm</i>	Rotações por minuto
CG	Cromatografia gasosa
DCT	Detector de condutividade térmica
GLP	Gás liquefeito de petróleo
HP	"Horse power"
IC	Intervalo de confiança
ODS	Substâncias que destroem o ozônio
PFCs	Compostos perfluorados
VOCs	Compostos orgânicos voláteis

---

### ***Siglas***

<b>AISI</b>	American Iron and Steel Institutes
<b>ASTM</b>	American Society for Testing Materials
<b>EIA</b>	Energy Information Administration
<b>FEM</b>	Faculdade de Engenharia Mecânica

# ÍNDICE

<b>Lista de Ilustrações</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xxi</b>
<b>Lista de Abreviaturas e Siglas</b>	<b>xxv</b>
<b>ÍNDICE</b>	<b>xxxii</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
1.1 Objetivo . . . . .	2
1.2 Objetivos específicos . . . . .	3
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>5</b>
2.1 Gaseificação . . . . .	5
2.2 Gaseificador de leito fluidizado . . . . .	8
2.3 Gás pobre e gás de síntese . . . . .	10
2.4 Impurezas . . . . .	13
2.4.1 Material particulado . . . . .	14
2.4.2 Alcatrão . . . . .	14
2.5 Plasma . . . . .	18
2.5.1 Plasma térmico e não-térmico . . . . .	19
2.5.2 Arco elétrico . . . . .	20
2.6 Tocha de plasma . . . . .	21
2.6.1 Arco não-transferido, transferido e sobreposto . . . . .	24
2.7 Tecnologias de limpeza de gás convencionais . . . . .	25
2.8 Tecnologia de limpeza de gás utilizando reforma a plasma . . . . .	30
<b>3 CÁLCULOS PRELIMINARES</b>	<b>35</b>
3.1 Análise convectiva e entálpica do gás de trabalho . . . . .	35
3.2 Balanço de massa e balanço de entalpia . . . . .	39
3.3 Propriedades do escoamento . . . . .	44
3.4 Queda de pressão no tubo convergente-divergente . . . . .	47

3.5	Conclusões preliminares . . . . .	49
<b>4</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>51</b>
4.1	Caracterização da biomassa . . . . .	51
4.1.1	Análise granulométrica . . . . .	51
4.1.2	Análise imediata . . . . .	52
4.1.3	Análise elementar . . . . .	52
4.1.4	Poder calorífico . . . . .	53
4.2	Análise de gás produzido . . . . .	53
4.3	Caracterização do material inerte . . . . .	55
4.3.1	Densidade a granel . . . . .	55
4.3.2	Fluidodinâmica do leito fluidizado . . . . .	56
4.4	Coleta de alcatrão e particulado . . . . .	57
4.5	Sistema de gaseificação . . . . .	59
4.5.1	Procedimento experimental . . . . .	62
4.6	Sistema de tocha a plasma . . . . .	63
4.6.1	Descrição do sistema . . . . .	63
4.6.2	Consumíveis . . . . .	65
4.7	Reforma a plasma . . . . .	66
4.8	Balanco de nitrogênio . . . . .	69
4.9	Análise de incertezas . . . . .	71
4.9.1	Desvio padrão . . . . .	71
4.9.2	Propagação de erro . . . . .	73
4.9.3	Intervalo de confiança . . . . .	75
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>	<b>79</b>
5.1	Caracterização da biomassa . . . . .	79
5.2	Caracterização do material inerte . . . . .	81
5.3	Operação do gaseificador de leito fluidizado . . . . .	82
5.4	Análise de gás produzido . . . . .	84
5.5	Análise de temperatura . . . . .	91
5.6	Análise de alcatrão e particulado . . . . .	93
5.7	Balanco de nitrogênio . . . . .	100
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>103</b>

<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICES</b>	<b>114</b>
<b>A Análise imediata</b>	<b>115</b>
<b>B Poder calorífico</b>	<b>119</b>
<b>C Cromatografia gasosa</b>	<b>123</b>
<b>D Sistema de coleta de alcatrão e material particulado</b>	<b>129</b>
<b>E Roteiro básico de operação do gaseificador</b>	<b>133</b>
<b>F Gráficos de temperatura</b>	<b>139</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A procura por fontes renováveis de energia para atender o consumo mundial é crescente. Antigamente, o ser humano utilizava a combustão de biomassa como principal fonte de geração de calor. Entretanto, com a introdução de combustíveis fósseis como carvão, petróleo e gás natural, o mundo se tornou dependente de tais combustíveis, sendo esses as principais fontes de energia utilizadas atualmente. O aumento no consumo dos combustíveis fósseis causam dúvidas pois não se sabe quanto de combustível fóssil ainda está disponível (Kumar, Jones e Hanna, 2009). De acordo com a previsão publicada pela US Energy Information Administration (EIA), estima-se que o mercado de geração de energia elétrica entre os anos de 2007 até 2035 aumentará sua produção aproximadamente em 49 % (Pellegrini et al., 2011). Desde a crise energética de 1970, aumentou-se o interesse pelas questões de eficiência energética e uso da biomassa como fonte de energia mediante o uso em sistemas de gaseificação, combustão e pirólise (Carvalho, 2010), e devido à oferta limitada de combustíveis fósseis convencionais e o consumo acentuado de energia, fontes alternativas estão sendo exploradas para suprir esta limitação, tendo como objetivo gerar desenvolvimento em energia sustentável (Meng et al., 2011), limpa e renovável.

Deste modo, pesquisas sobre o uso de biomassa mostram a viabilidade técnica da geração de calor e eletricidade por meio do processo de gaseificação (Rutberg et al., 2011), sendo que tal processo é estudado a nível internacional e envolve a gaseificação de biomassas diversas (Shie et al., 2011), tratamento de resíduos (Rutberg, 2003) e reforma de gases contaminantes (Oda, 2003).

Os gases combustíveis gerados pela gaseificação são basicamente o monóxido de carbono ( $CO$ ), hidrogênio ( $H_2$ ) e metano ( $CH_4$ ). A utilização de biomassa para gaseificação visa diminuir os poluentes gerados pelo processo de gaseificação sem comprometer a eficiência e rendimento do processo (Pellegrino, 2006).

O estudo da gaseificação de biomassa é justificado pelo grande potencial existente em termos de biomassa em nosso país e pela possibilidade da disseminação dessa tecnologia em âmbito nacional, já que poucos são os centros que estudam este tema (Andrade, 2007). Ainda, de acordo com Bridgwater (1995), a biomassa é considerada o combustível com maior potencial para o futuro, principalmente quando se leva em conta a possibilidade da utilização de resíduos agrícolas, industriais e domésticos. Sendo assim, o estudo da conversão térmica da biomassa torna-se um fator de grande interesse (Bridgwater, 2012).

Entretanto, a principal dificuldade encontrada para o desenvolvimento da gaseificação é a qualidade do gás produzido, que é uma importante insumo para diversos tipos de aplicações na área de energia. Este gás contém frações de hidrocarbonetos pesados, chamadas comumente de alcatrão de biomassa, os quais se condensam e causam diversos danos ao sistema de combustão do gás (Nair et al., 2003). Sendo assim, deseja-se a purificação do gás de gaseificação e uma solução é utilizar a tecnologia da tocha de plasma para a reforma do gás de gaseificação.

A tocha de plasma é um equipamento versátil que pode alcançar temperatura alta na sua proximidade, na faixa de 5000 à 50000 Kelvin, e possui utilizações práticas tais como a deposição de filmes finos, soldagem, auto-fornos industriais, produção de pós metálicos, análise de elementos químicos, gaseificação a plasma, entre outros (Godoy, 1997).

Dentre suas diversas vantagens, pode-se incluir a capacidade do plasma conduzir alta potência para o processo, flexibilidade na escolha do tipo de material a ser tratado, tempo de resposta rápido, eficiência elevada de conversão e operações em diversas configurações seletivas de processos químicos incluindo a oxidação parcial, reforma a vapor e pirólise. Na área de reforma de gás de síntese, as tecnologias utilizadas são a reforma a vapor, oxidação parcial, oxidação parcial catalítica, reforma autotérmica e reforma com membrana catalítica (Justiniano et al., 2008). Além dessas, o reformador a plasma pode ser utilizado para a obtenção de gases e outros produtos combustíveis através do processo Fischer-Tropsch. Por fim, o processo de reforma do gás de gaseificação por meio de tocha de plasma é considerado limpo em termos ambientais (pois somente insere o gás de trabalho  $N_2$  no gás de gaseificação), ou seja, não acrescenta contaminantes no gás e, conseqüentemente, ao meio ambiente (Godoy, 2001).

## 1.1 Objetivo

Com o cenário apresentado, o objetivo deste trabalho é realizar um estudo de caso para redução do teor de alcatrão e material particulado presentes no gás de gaseificação utilizando a tocha de plasma comercial da marca Hypertherm, modelo powermax1250 com tocha mecanizada T80M, que opera em modo de arco elétrico com corrente contínua, plasma térmico, arco confinado e não-transferido que utiliza nitrogênio comercial como gás de trabalho.

## **1.2 Objetivos específicos**

Como objetivo secundário tem-se o projeto, construção e testes preliminares de um misturador (tubo convergente-divergente) de gases de gaseificação de biomassa com tocha de plasma.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Gaseificação

A gaseificação é definida como a conversão térmica de produtos que contenham carbono em um gás combustível. Este gás possui aplicações tais como a combustão em motores para produção de energia elétrica, geração de calor, como matéria prima em sínteses químicas, entre outros (Sánchez, 1994). Um dos grandes objetivos do processo de gaseificação é maximizar a produção em gases compostos principalmente de  $CO$ ,  $H_2$  e  $CH_4$  (Arena, 2012). Sendo assim, a gaseificação pode ser vista como uma forma de flexibilização do uso energético da biomassa e apresenta-se como uma tecnologia distinta às fontes tradicionais derivadas de combustível fóssil (Fernandes, 2004).

Para exemplificar esta flexibilização, a biomassa é capaz de produzir energia elétrica por meio da sua combustão direta em caldeira ou turbina a gás e, além disso, a energia elétrica também pode ser obtida através da injeção do gás em um motor a combustão interna, célula combustível ou turbina a vapor. Estes sistemas podem produzir calor, energia e podem alcançar eficiências de 30 a 40 %.

O poder calorífico é um dado muito importante para a aplicação do gás de síntese na produção de combustíveis de segunda geração, devendo ficar sempre acima de  $11 \text{ MJ.Nm}^{-3}$  para que sejam adaptáveis aos combustíveis fósseis convencionais (Ciferno e Marano, 2002).

Para compreender a visão geral do processo da tecnologia de gaseificação, o caminho de conversão de energia é dada pela energia biológica e química da biomassa, que é transformada em energia térmica e energia química e estas são usadas em máquinas térmicas gerando potência mecânica que pode ser transformada em eletricidade (Sánchez, 2010).

O sucesso de utilização desta tecnologia de conversão térmica é determinada pela sua confiabilidade técnica, sustentabilidade ambiental e conveniência econômica (Arena, 2012). De acordo com Goldemberg (2009), o interesse na gaseificação, como uma forma de agregar valor a matéria-prima, também pode estar no desenvolvimento da produção de matéria-prima energética com outro produto agrícola ou outro resíduo e, portanto, reduzir custos e aumentar os benefícios ambientais.

O agente oxidante da gaseificação pode ser: ar, oxigênio ou vapor de água. Na composição do gás de gaseificação produzido está presente o  $CO$ ,  $CO_2$ ,  $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2$  (se o agente oxidante for ar), entre outros elementos (Andrade, 2007), como particulados, alcatrão e cinzas (Fernandes, 2004).

Existem diversas reações que envolvem a gaseificação (CENBIO, 2002). Durante o processo, ocorrem reações exotérmicas de oxidação e endotérmicas de redução, que envolvem as fases sólida e gasosa (Sánchez, 2010) como é visto na Tabela 2.1.

Tabela 2.1: Reações heterogêneas e homogêneas, (adaptada de Pellegrino, 2006).

Reações heterogêneas sólido (s) e gás (g)		
Etapa	Reação	$\Delta H$ [KJ.mol <sup>-1</sup> ]
Oxidação do carbono	$C_s + 1/2O_{2(g)} \rightarrow CO$	-110,6
	$C_s + O_{2(g)} \rightarrow CO_2$	-393,8
Reação de Boudouard	$C_s + CO_{2(g)} \rightarrow 2CO$	+173,0
Reação Carbono-Água	$C_s + H_2O_g \rightarrow CO + H_2$	+135,0
	$C_s + 2H_2O_g \rightarrow CO_2 + 2H_2$	+96,0
Formação de Metano	$C_s + 2H_2O_g \rightarrow CH_4$	+74,9
	$C_s + 2/3H_2O_g \rightarrow 1/3CH_4 + 2/3CO$	+62,0
	$C_s + H_2O_g \rightarrow 1/2CH_4 + 1/2CO_2$	+6,0
Reações homogêneas gás (g) e gás (g)		
Etapa	Reação	$\Delta H$ [KJ.mol <sup>-1</sup> ]
Reação de shift	$CO_g + H_2O_g \rightarrow CO_2 + H_2$	-38,0
Reação de Metano-água	$CH_{4(g)} + H_2O_g \rightarrow CO + 3H_2$	+201,9
Monóxido de Carbono-Oxigênio	$CO_g + 1/2O_{2(g)} \rightarrow CO_2$	-283,0
	$2CO_g + 2H_{2(g)} \rightarrow CH_4 + CO_2$	-247,3

As reações de gaseificação ocorrem em um equipamento comumente chamado de gaseificador. Espera-se que este gaseificador tenha a capacidade de produzir um gás combustível limpo e de alta qualidade a partir de uma ampla variedade de biomassas, de trabalhar eficientemente sem

atenção constante e de responder rapidamente às alterações de carga do processo de alimentação da matéria-prima.

Em operação, estes requisitos citados podem ser conflitantes, pois para cada projeto é necessário que se faça um estudo relacionado ao combustível utilizado e ao uso final particular em algum sistema de queima (Sánchez, 1994). De acordo com Vaezi et al. (2012), o uso final exige uma série de ajustes que são influenciados pelo oxigênio e razão entre carbono e hidrogênio ( $C/H$ ) do material gaseificado que afeta diretamente a produção dos gases da gaseificação.

Os gaseificadores são classificados de acordo com o poder calorífico produzido, tipo de agente gaseificador, tipo de leito, pressão de trabalho e tipo de combustível. A classificação é detalhada na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Classificação dos gaseificadores, (adaptada de Behainne, 1999).

Parâmetro	Característica
Poder calorífico do gás produzido	Gás de baixo poder calorífico: até $5 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ Gás de médio poder calorífico: de 5 a $10 \text{ MJ.Nm}^{-3}$ Gás de alto poder calorífico: de 10 a $40 \text{ MJ.Nm}^{-3}$
Tipo de agente gaseificante	Ar Vapor de água Oxigênio Hidrogênio
Tipo de leito	Leito fixo Leito fluidizado
Pressão de trabalho	Atmosféricos Pressurizados: até $2000 \text{ kpa}$
Tipo de combustível	Combustível fóssil (derivados do petróleo) Combustível não fóssil (biomassa)

## 2.2 Gaseificador de leito fluidizado

O gaseificador de leito fluidizado é definido como um equipamento onde um gás passa em sentido ascendente por um leito de partículas sustentado por um distribuidor (Geldart, 1986). Mais detalhes são dados por Behainne e Sánchez (2010), em que um gaseificador de leito fluidizado consiste em um reator que contém em seu interior uma mistura de partículas combustíveis e, se necessário, de material inerte suportado por uma placa distribuidora na parte inferior do reator. O agente gaseificante atravessa a placa distribuidora no sentido ascendente e em quantidade suficiente para conseguir que a força de arraste do escoamento do fluido supere o peso dos sólidos do leito e promova a fluidização e, simultaneamente, as reações de gaseificação.

É importante classificar os regimes de fluidização dentro do reator de gaseificação: leito fixo, mínima fluidização, fluidização borbulhante, fluidização turbulenta, fluidização rápida e transporte pneumático. Inicialmente, para entender a classificação dos regimes de fluidização, suponha que um gás atravesse, com baixa velocidade, o distribuidor de um reator de gaseificação e encontre o leito que contenha partículas inertes. Neste leito o gás exerce pouca força sobre as partículas devido a baixa velocidade e, por isso, este leito permanece inalterado ou fixo. Após este regime, com o aumento gradual da velocidade do gás, há também o aumento da força de arraste sobre as partículas do leito e, em determinado instante, o leito começa a se expandir até que a força de arraste se torna de mesma magnitude que o peso das partículas. Neste ponto, este regime do leito é chamado de ponto de mínima fluidização e está vinculado diretamente com a velocidade de mínima fluidização. Novamente, com o aumento da velocidade do gás, inicia-se a formação de bolhas no interior do leito, caracterizando o regime fluidizado borbulhante. Aumentando-se ainda mais a velocidade do gás, o leito entra no regime de fluidização turbulenta, posteriormente em fluidização rápida e, finalmente, transporte pneumático em fase diluída, completando assim os regimes de fluidização. Neste último regime se caracteriza a velocidade terminal das partículas, que é a velocidade com que o gás carrega a maioria das partículas do leito (Kunii e Levenspiel, 1991).

Dentro da classificação de gaseificadores de leito fluidizado, eles ainda podem ser divididos em gaseificador do tipo borbulhante ou circulante. No gaseificador borbulhante, as partículas elutriadas pelo processo não são redirecionadas de volta para o leito, enquanto que nos gaseificadores de leito fluidizado circulante, as partículas arrastadas pelo processo são redirecionadas novamente para o leito por meio de um ciclone (Andrade, 2007). A Figura 2.1 apresenta um desenho esquemático de um gaseificador de leito fluidizado.

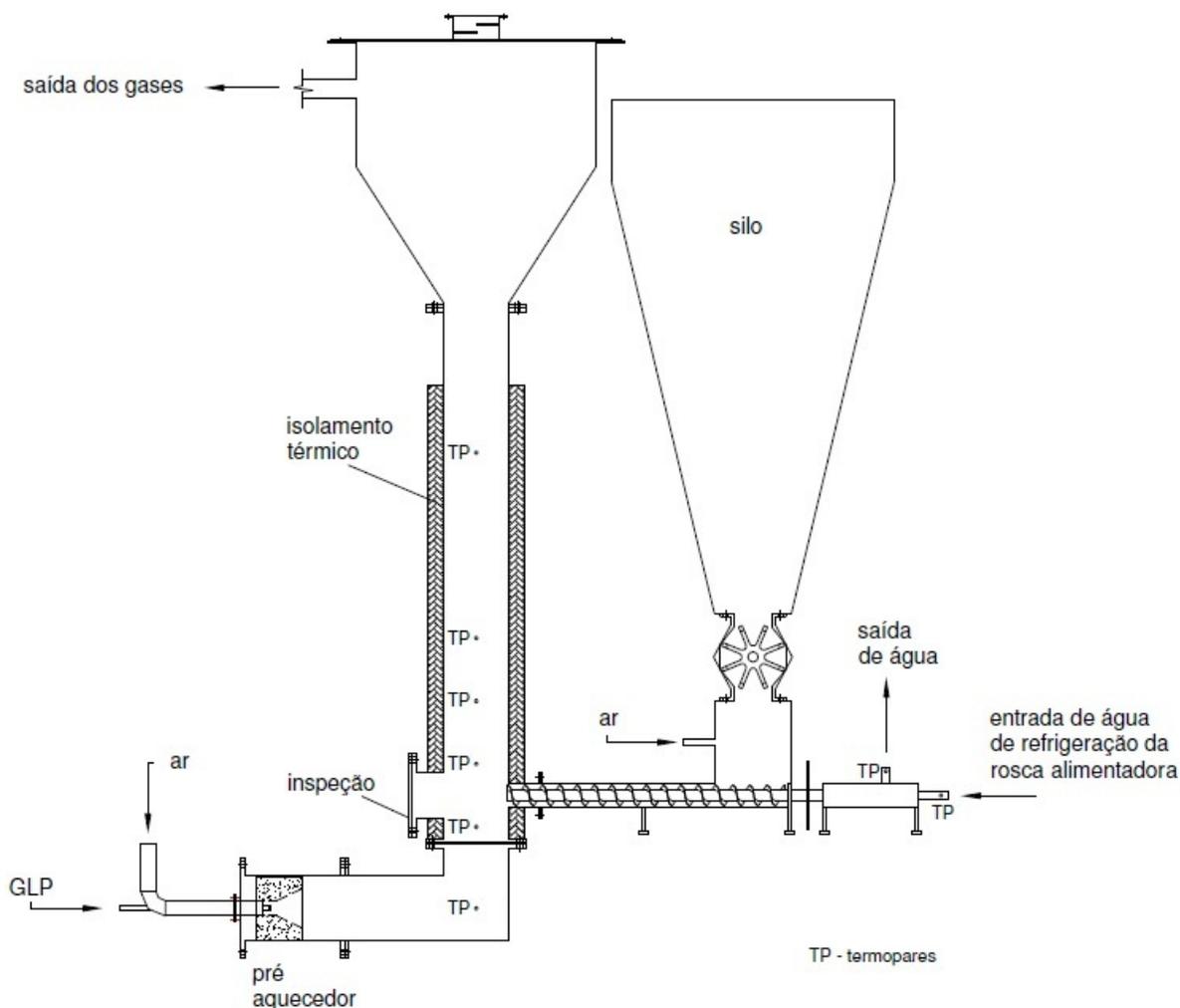


Figura 2.1: Desenho esquemático de um gaseificador de leito fluidizado.

Apesar de a classificação anterior ser universalmente aceita para fins experimentais, é preciso uma categorização mais rigorosa dos gaseificadores em leito fluidizado que considere o regime fluidodinâmico do escoamento entre gás e sólido e a matéria-prima presente na fluidização do leito. É importante ressaltar este aspecto, pois a eficiência de um gaseificador depende, essencialmente, das características do contato entre gás e sólido na câmara de reação. Estas características são determinadas pela fluidodinâmica do leito como o valor da velocidade superficial do gás de fluidização, as propriedades das partículas, a característica ou quantidade dos sólidos na suspensão, pela geometria da coluna de gaseificação (Sánchez, 2010), por meio das condições de operação da gaseificação como temperatura, pressão, características do combustível (umidade, granulometria e composição) e teor de oxigênio no agente gaseificador (Cortez e Lora, 1997), fatores que influenciam direta-

mente na qualidade do gás gerado (Naváez, 1999).

Nas reações do processo de gaseificação são empregadas temperaturas elevadas, que estão na faixa de 973 a 1273  $K$  quando o agente de gaseificação utilizado é o ar e na faixa de 1273 a 1673  $K$  quando se utiliza oxigênio puro. De acordo com Gómez (1996), tecnologia da gaseificação com ar é tecnologicamente mais simples e frequentemente a mais utilizada devido ao alto custo dos outros agentes de gaseificação, como o oxigênio e vapor, e aos problemas relacionados à segurança das instalações.

Alguns gaseificadores de leito fluidizado são historicamente conhecidos como o processo Winkler (de 1926), U-Gás desenvolvido pelo Institute of Gas Technology (E.U.A.), Westinghouse (de 1972), COGAS, HYGAS, CO<sub>2</sub>-Acceptor, Synthane, processo High Temperature Winkler (Behainne, 1999; Sánchez, 2010), processo de cinza seca Lurgi, processo Koppers-Totzek, processo Shell Oil Co., processo Texaco e processo Destec Energy (Klass, 1998).

### **2.3 Gás pobre e gás de síntese**

O gás produzido pela gaseificação pode ser classificado em gás pobre ou gás de síntese. A diferença básica na produção do gás pobre e o gás de síntese está apresentada pela Figura 2.2. A Tabela 2.3 apresenta a composição característica do gás pobre.

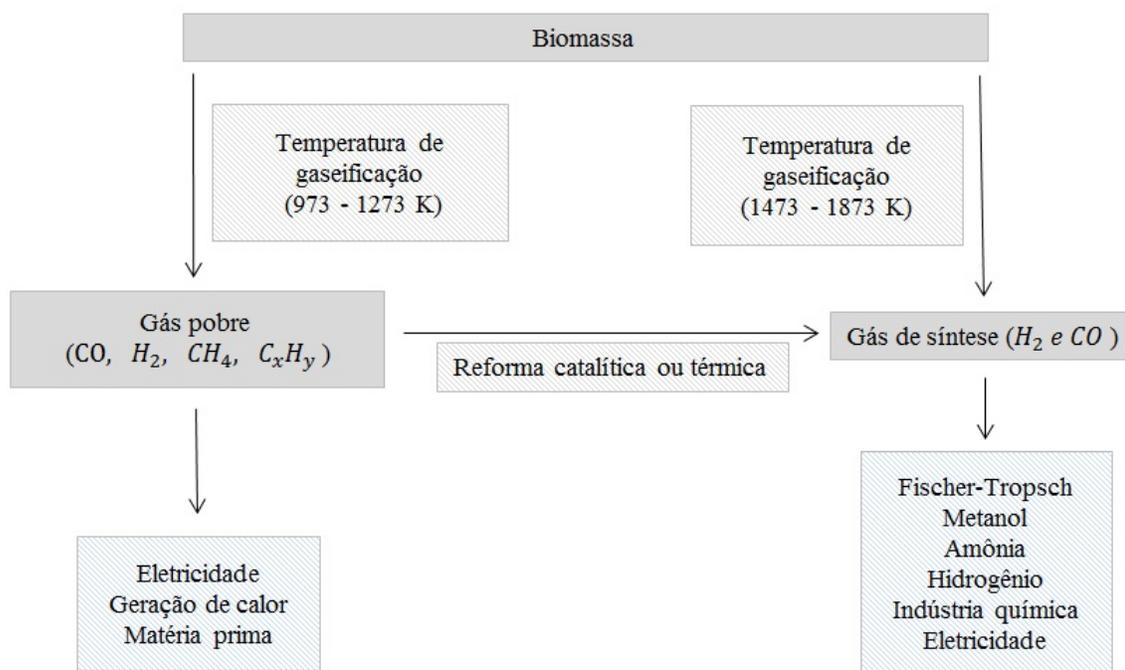


Figura 2.2: Gás gerado e aplicação do gás pobre e gás de síntese, (adaptado de Boerrigter e Rauch, 2005).

Tabela 2.3: Composição típica do gás pobre, (adaptado de Andrade, 2007).

Elemento	Teor [%]
Hidrogênio	10 a 15
Nitrogênio	40 a 45
Monóxido de carbono	15 a 20
Dióxido de Carbono	10
Vapor de água	15
$C_2H_4, C_2H_6, C_3H_6$	Traços pequenos
Razão $H_2/CO$	0,5 a 1,0

O gás liquefeito de petróleo (GLP) pode ser substituído pelo gás pobre, entretanto, algumas considerações devem ser levadas em conta como o poder calorífico e condições operacionais como o volume dos gases de combustão e a quantidade de ar (Sánchez, 2010).

O gás de síntese é um gás que contém frações de  $CO$  e  $H_2$  (van der Drift e Boerrigter, 2006)

e, em termos gerais, é livre de alcatrão e particulados (Gómez, 1996). De acordo com Steynberg e Dry (2004), existem somente dois processos para obtenção do gás de síntese: gaseificação e reforma de gás.

De acordo com van der Drift et al. (2004), a produção em escala mundial de gás de síntese em 2004 foi de 6 EJ (exajoule), que correspondia aproximadamente a 2% de energia consumida mundialmente naquela época. A principal fonte de produção de gás de síntese era de energia fóssil como carvão, gás natural e óleo. De acordo com a Figura 2.3 é possível observar o mercado de gás de síntese mundial no ano de 2004 e sua estimativa para o ano de 2040, chegando a uma produção mundial de 50 EJ, dominada principalmente pelo gás de síntese produzido por fontes não fósseis.

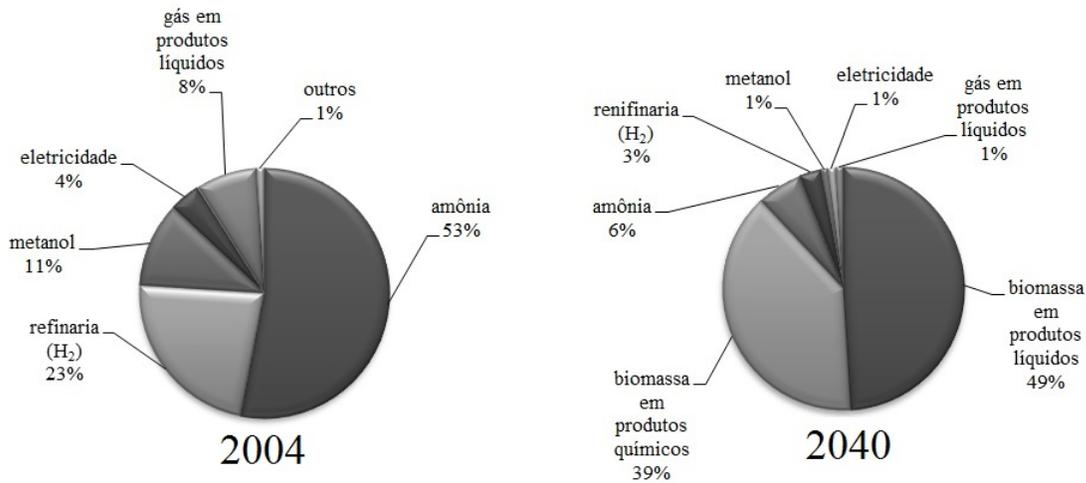


Figura 2.3: Mercado de gás de síntese mundial no ano de 2004 e estimativa para 2040, (adaptado de van der Drift et al. 2004).

A produção comercial de gás de síntese está ganhando atenção significativa devido à crescente demanda deste combustível no mercado mundial (Raju et al., 2008). Com o gás de síntese pode-se produzir calor, eletricidade e produtos combustíveis e, dentre as principais aplicações, cita-se a produção de hidrogênio, alcoóis, oleofinas, amônia e combustíveis líquidos sintéticos e gasosos (Bain, 2006). Na Tabela 2.4 é resumida algumas características desejáveis do gás de síntese e do gás pobre para aplicações diretas.

Tabela 2.4: Características desejáveis de gás de gaseificação para produção de alguns combustíveis, (adaptado de Ciferno e Marano, 2002 e Zuberbühler, 2006).

	Metano	Metanol	Hidrogênio
$H_2/CO$	$\cong 3,0$	$\cong 2,0$	
Pressão [ <i>bar</i> ]	1 – 10	$\cong 50_l$ $\cong 140_g$	$\cong 28$
Temperatura [ <i>K</i> ]	573 – 673	273 – 373	273 – 373
Catalisador	<i>Ni</i>	<i>Cu/ZnO</i>	
Metais pesados		< 1ppm	< 1ppm

## 2.4 Impurezas

A principal aplicação do gás pobre no processo de síntese catalítica está intrinsicamente ligada com a quantidade de impurezas. Na maioria das vezes, a qualidade deste gás é dependente de investimentos na limpeza (Boerrigter e Rauch, 2005), no qual deve ser livre de particulados e outros contaminantes. De acordo com Basu (2010), pode-se atribuir três principais tipos de impurezas encontradas no gás: particulados sólidos (carvão e cinzas), impurezas inorgânicas (haletos, metais alcalinos, compostos de enxofre e nitrogênio) e impurezas orgânicas (alcatrão, aromáticos e dióxido de enxofre).

A quantidade de cada componente contaminante no gás é devido aos parâmetros do processo de gaseificação e composição da biomassa utilizada, sendo que alguns dos principais contaminantes do gás de gaseificação estão listados na Tabela 2.5.

Tabela 2.5: Contaminantes do gás de gaseificação, (adaptado de Gray, Tomlinson e Berger, 1996).

Estado	Contaminantes	Variedades	Principais problemas
Sólido	Materiais particulados	Cinza e carvão	Erosão
	Metais alcalinos	Compostos de sódio e potássio	Problema com catálise
Líquido	Compostos nitrogenados	<i>HCN</i> e <i>NH<sub>3</sub></i>	Emissões perigosas
	Alcatrão	Aromáticos	Entupimento de filtros
Gasoso	Enxofre e cloro	<i>H<sub>2</sub>S</i> e <i>HCl</i>	Corrosão do sistema, emissões perigosas e problema com catálise

De acordo com Bizzo (2010), dentre os componentes que causam problemas ao sistema de gaseificação como apresentado pela Tabela 2.5 e considerando aplicações para pequena escala e geração de energia, deve-se controlar o material particulado e o alcatrão presentes no gás de gaseificação.

#### 2.4.1 Material particulado

O material particulado é arrastado pelo gás de gaseificação quando o seu tamanho, dentro do reator, torna-se pequeno o suficiente para ser carregado aerodinamicamente pelos gases, sendo este processo chamado comumente de elutriação. Da mesma maneira que o material particulado, as cinzas são formadas na medida em que a partícula de biomassa é consumida nas reações e, então, arrastadas pelo escoamento de gases (Bizzo, 2010). Existem diversas tecnologias para remoção do material particulado como por exemplo, ciclones, filtros de barreira, filtros eletrostáticos, lavadores a gás, entre outros (Boerrigter e Rauch, 2005).

#### 2.4.2 Alcatrão

Normalmente, refere-se ao alcatrão como um hidrocarboneto pesado que pode ser tratado ou purificado por meio de processos térmicos, catalíticos ou físicos (Fourcault, Marias e Michon, 2010). Formalmente, o alcatrão é definido como o produto orgânico obtido pelo regime térmico ou

de oxidação parcial de qualquer material, constituindo-se de cadeias aromáticas grandes (Milne, Evans e Abatzoglou, 1998). Ainda mais, o alcatrão, proveniente do processo de gaseificação de biomassa, é uma complexa mistura de hidrocarbonetos, oxigenados ou não, cuja composição pode variar em função do tipo de gaseificador, do tipo de biomassa, do fator de ar, da temperatura de operação, entre outros. De um modo geral, de acordo com Sanchez (2010), os principais componentes do alcatrão são as olefinas, os aromáticos, os poliaromáticos e os produtos derivados da celulose e lignina. A Figura 2.4 apresenta a composição típica do alcatrão.

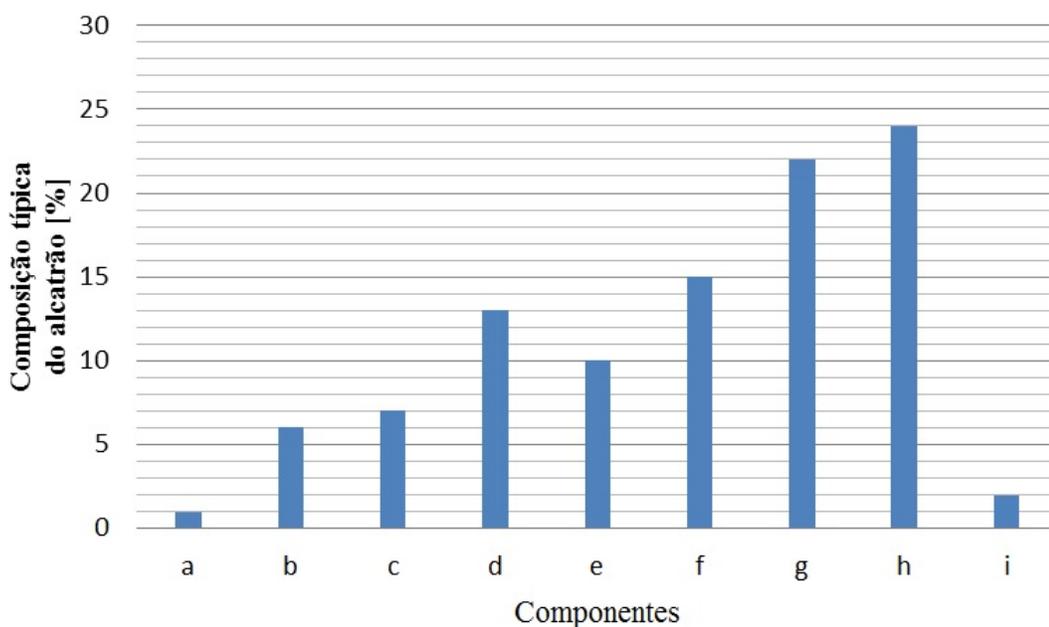


Figura 2.4: Composição típica do alcatrão obtido pela gaseificação de biomassa, (adaptado de Coll et al., 2004) (a: hidrocarboneto com quatro anéis aromáticos; bb: hidrocarboneto com três anéis aromáticos; c: compostos fenólicos; d: hidrocarbonetos com dois anéis aromáticos; e: compostos heterocíclicos; f: Naftaleno; g: hidrocarboneto com um anel aromático; h: tolueno; i: outros).

O alcatrão é classificado em alcatrão primário, secundário e terciário. As moléculas de celulose e lignina se quebram formando o alcatrão primário, entre eles, levoglucosan, acetaldeído, furfural, derivados de hemicelulose e derivados de lignina. O alcatrão secundário contém fenóis e olefinas (Fourcault, Marias e Michon, 2010). No alcatrão terciário encontra-se duas classificações: alcatrão terciário alquilado e condensado. No alcatrão terciário alquilado encontra-se os metis aromáticos e derivados (metil naftaleno, tolueno, entre outros). No terciário condensado encontra-se os hidrocarbonetos poliaromáticos (benzeno, antraceno, naftaleno, fenentreno, entre outros) (Bizzo, 2010). A Figura 2.5 apresenta o teor de alcatrão típico produzido em um reator de leito fluidizado

em função da temperatura de reação em que é possível observar a faixa de temperatura onde ocorre a formação de alcatrão, 300 a 1050 °C, sendo que a temperatura e a produção de alcatrão são inversamente proporcionais.

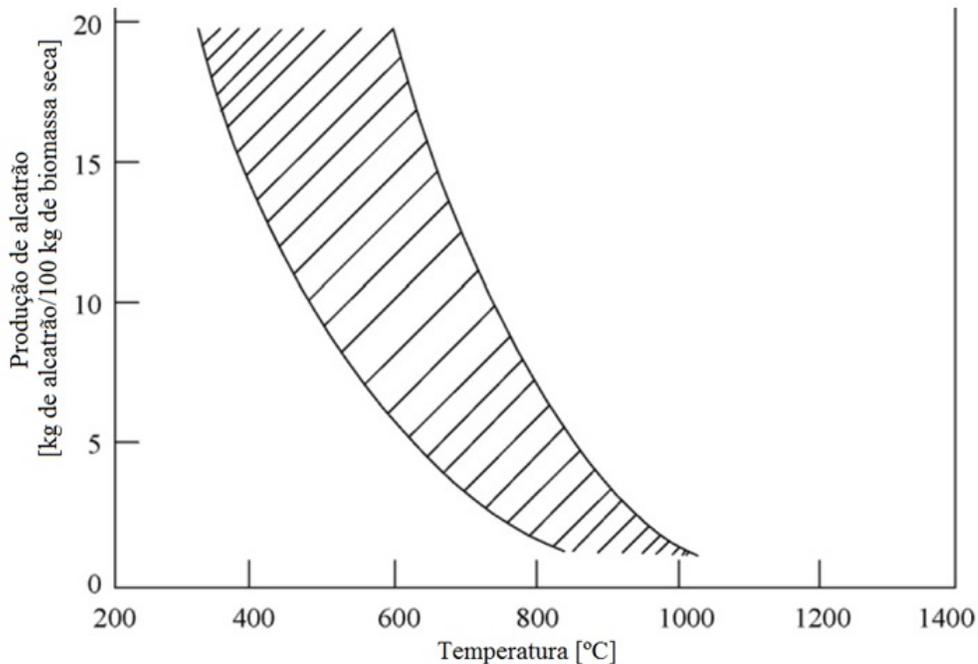


Figura 2.5: Teor de alcatrão produzido em gaseificador de leito fluidizado em função da temperatura, (adaptado de Baker et al. 1988).

O alcatrão é um subproduto indesejável proveniente do processo de gaseificação e, desta forma, motiva o interesse na reforma deste em gases combustíveis (Justiniano et al., 2010). A aplicação bem sucedida do gás de gaseificação depende da quantidade de alcatrão presente no gás combustível, o qual é um dos principais problemas encontrados no sistema de gaseificação (Anis e Zainal, 2011).

Os sistemas utilizando para controle e limpeza do gás de gaseificação são tecnicamente viáveis, entretanto podem se tornar caros a ponto de inviabilizar economicamente a tecnologia de gaseificação. Motores de combustão interna e turbinas a gás de construção robusta aceitam pequenas quantidades de alcatrão e particulados. Alguns reatores de gaseificação devem ser constantemente monitorados, pois produzem alcatrão e partículas pequenas de carbono que causam danos ao sistema (Mukunda, Dasappa e Shrinivasa, 1993). As concentrações dos contaminantes em gaseificadores de leito fluidizado variam de acordo com os parâmetros de sistema de gaseifi-

cação e se encontram na faixa de 8000 a 100000  $mg.Nm^{-3}$  para o material particulado e 5000 a 75000  $mg.Nm^{-3}$  para o alcatrão de acordo com Hasler e Nussbaumer (1999). Estes valores estão acima do máximo permitido para uso em células a combustível, motor de combustão interna e turbina a gás como apresentado pela Tabela 2.6.

Tabela 2.6: Valor típico de contaminante e qualidade do gás para geração de potência. (i) Hasler e Nussbaumer (1999); (ii) Tao (2010); (iii) Kaltschmitt e Hartmann (2001).

	Unidade	Célula a combustível	Motor de combustão interna	Turbina a gás
Tamanho de partícula	$\mu m$		< 10(i)	< 5(ii)
Material particulado	$mg.Nm^{-3}$		< 50(i)	< 30(ii)
Metais alcalinos	$mg.Nm^{-3}$		< 0,25(i)	< 0,24(ii)
Alcatrão	$mg.Nm^{-3}$	< 1(iii)	< 100(i)	< 0,5(ii)

A purificação do gás ou, particularmente, a remoção do alcatrão pode ser classificado em cinco grupos de acordo com a tecnologia utilizada (Han e Kim, 2008): método mecânico ou físico, modificação dos parâmetros operacionais, craqueamento catalítico, craqueamento térmico e craqueamento a plasma.

No método mecânico ou físico estão os purificadores mecânicos como o ciclone, precipitador eletrostático, filtro de manga, torre de lavagem, entre outros, sendo sua principal função a captura de particulados que compõem o gás produto. A tecnologia de modificação dos parâmetros operacionais é a alteração da produção de alcatrão de acordo com as variáveis de gaseificação prevenindo, portanto, a formação de alcatrão. O craqueamento catalítico ocorre com a presença de algum elemento catalisador como dolomita, compostos de níquel, óxido de alumínio, entre outros. O craqueamento térmico envolve processos no qual os gases são aquecidos a certa temperatura e então quebrados termicamente em moléculas mais leves. O craqueamento a plasma é análogo ao craqueamento térmico, entretanto o processo térmico ocorre com uma temperatura muito mais elevada, proporcionando assim, menor tempo de residência e maior quebra de moléculas pesadas em leves.

## 2.5 Plasma

O estado de plasma é frequentemente chamado de quarto estado da matéria de acordo com a sequência: sólido, líquido, gás e plasma. Esta classificação como estado da matéria é justificada pelo fato de mais de 99 % do universo conhecido ser constituído de plasma (Boulos, Fauchais e Pfender, 1994). O plasma aqui definido será restrito ao plasma gasoso que é constituído basicamente de elétrons, íons e partículas neutras resultante da ionização de gases neutros, no qual os componentes com cargas opostas são forçados a se neutralizarem em escala macroscópica, originando assim o termo quase-neutro, visto que o número de cargas positivas é igual ao número de cargas negativas (Roth, 1995). A Equação (2.1) apresenta o comportamento de um gás monoatômico, por exemplo, o argônio ( $Ar$ ), no estado de plasma gasoso.



O plasma não é difícil de ser encontrado, pois na prática o estado de plasma ocorre em uma escala extremamente grande de temperatura e pressão (Angeles, 2003) como em raios, lâmpadas fluorescentes, televisores de plasma, ventos solares e aurora boreal (Fitzpatrick, 2011).

A corrente elétrica através do ar ionizado, ou arco elétrico, é o meio físico responsável pela conversão da energia elétrica em térmica (Godoy, 1997). Tornou-se o centro da atenção na metade do século XX devido às necessidades de soluções para o problema do aquecimento de gases em túneis aerodinâmicos para modelamento do vôo supersônico, e em pesquisas de reentrada na atmosfera de naves espaciais. Os resultados teóricos e experimentais obtidos nos anos posteriores resultaram em um grande aumento nas aplicações do plasma em diferentes áreas da tecnologia (Zhukov, 1994). Os plasmas mais comuns gerados a partir de descarga elétrica e seus parâmetros típicos estão apresentados na Tabela 2.7

Tabela 2.7: Parâmetros típicos de plasma gerados por descargas elétricas, (adaptado de Maciel, 2007).

Parâmetro	Descarga luminescente	Descarga de barreira dielétrica	Gliding arc	Tocha de plasma
Pressão [ <i>bar</i> ]	< 0,010	1	1	> 1
Energia dos elétrons [ <i>eV</i> ]	< 5	1 – 10	1 – 10	1 – 3
Densidade de elétrons [ <i>cm<sup>-3</sup></i> ]	10 <sup>8</sup> – 10 <sup>11</sup>	10 <sup>11</sup> – 10 <sup>12</sup>	> 10 <sup>13</sup>	10 <sup>15</sup> – 10 <sup>16</sup>
Temperatura do gás [ <i>K</i> ]	300 – 600	300 – 600	300 – 2000	3000 – 10000
Tensão [ <i>V</i> ]	400 – 900	< 10 <sup>3</sup>	< 10 <sup>3</sup>	100 – 500
Corrente [ <i>A</i> ]	< 1	< 0,3	< 1	75 – 500

### 2.5.1 Plasma térmico e não-térmico

O plasma térmico, que também é classificado como plasma quente, é assim definido por possuir equilíbrio termodinâmico local, ou seja, todos os componentes do plasma (elétrons, íons e nêutrons) possuem temperatura semelhante, sendo que esta condição prevalece por toda a coluna do arco elétrico (Baratelli, 2004). Para que o plasma se encontre em equilíbrio termodinâmico local, é necessário que a pressão de operação seja maior que 1 *bar*, em correntes superiores a 50 *A* (Roth, 1995). No campo experimental, é impossível criar um plasma que possua um equilíbrio termodinâmico total, isto implicaria que as paredes do reservatório em que se encontra o plasma teria que estar a mesma temperatura que a do plasma. Sendo assim, não existem materiais que possam suportar temperaturas tão altas (Angeles, 2003).

No plasma não-térmico, que é também conhecido como plasma frio, é assim classificado pela temperatura dos elétrons ser maior que a temperatura dos componentes pesados como os íons e partículas neutras (Boulos, Fauchais e Pfender, 1994) e a pressão de operação menor que 1 *bar* (Roth, 1995).

A Figura 2.6 apresenta os regimes de plasmas térmico e não-térmico em função da temperatura cinética do gás e dos elétrons em função da pressão.

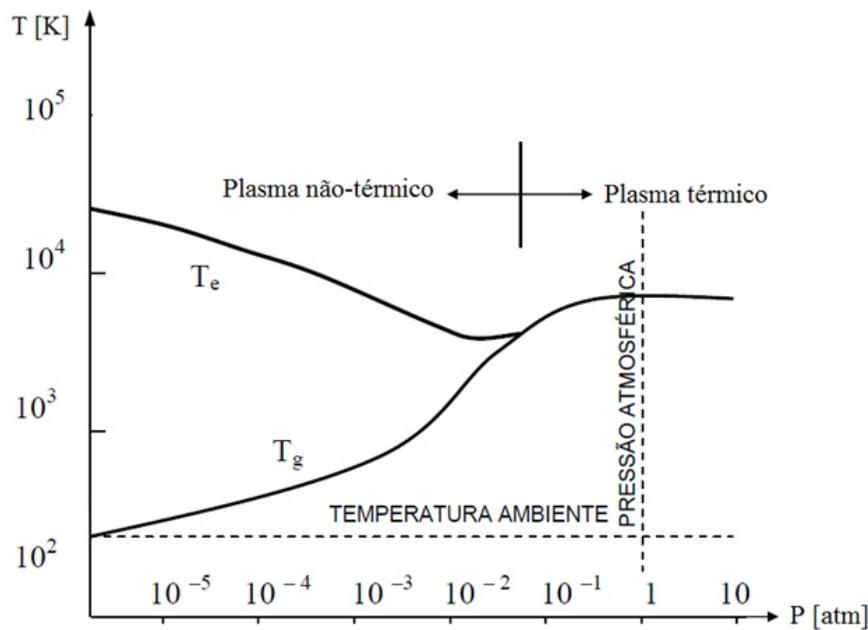


Figura 2.6: Classificação do plasma não-térmico em função da temperatura e pressão onde  $T_e$  é a temperatura dos elétrons e  $T_g$  do gás de plasma, (adaptado de Roth, 1995).

## 2.5.2 Arco elétrico

Seja uma estrutura eletrônica formada pelo conjunto cátodo e ânodo dentro de uma câmara evacuada. Quando há o aquecimento do cátodo, alguns elétrons podem deixar a superfície do cátodo em direção ao ânodo, formando uma descarga elétrica conhecida como efeito termiônico. Quando se introduz um gás dentro desta câmara, os elétrons emitidos pelo cátodo irão colidir com moléculas do gás e, assim, ionizar e gerar mais elétrons livres para continuar o processo de bombardeamento em outras moléculas deste gás, sendo esta a definição para arco elétrico (Baratteli, 2004). De acordo com Godoy (2001), a queda de tensão nos eletrodos é função do material e do tipo de gás utilizado para gerar o plasma, sendo independente do comprimento do arco e da corrente. Já a tensão no arco formada é dependente da natureza, temperatura e pressão da atmosfera em que o arco está operando.

Existem dois tipos de arcos elétricos. O primeiro é o arco elétrico livre no qual o processo de troca de calor entre o arco e o gás ambiente se dá por convecção natural e, por outro lado, o arco elétrico confinado em que a troca de calor do processo e o gás ambiente se dá por convecção

forçada. A tocha de plasma é comumente empregada com arco confinado (Junior, 2006), esta possui maior eficiência quando comparada ao arco livre, pois de acordo com Angeles (2003), apresenta uma temperatura aproximadamente seis vezes maior.

## 2.6 Tocha de plasma

Um gerador a plasma, tocha de plasma ou plasmatron é simultaneamente um equipamento eletrotécnico e térmico. É um instrumento altamente flexível em sua aplicação. As tochas de plasma são hoje utilizadas no corte, solda, fusão e refino de metais, em ligas e cerâmicas, na metalurgia extrativa, lingotamento contínuo de aços, deposição (plasma spray) de camadas cerâmicas e metais protetores de superfícies, inertização (pirólise) de produtos químicos tóxicos, lixo hospitalar e industrial. Além disso, seu uso é aplicado na decomposição térmica de materiais (por exemplo, do metano, etanol e outros combustíveis para a produção do hidrogênio para fins de uso em células combustíveis), síntese de produtos químicos (acetileno, carbetos de cálcio, entre outros) e de novos materiais cerâmicos (óxidos, nitretos, carbetos, entre outros). Também é notável a utilização de tochas de plasmas em esferoidização e mudança de fase de cerâmicas, tratamento térmico de superfícies, recuperação de metais de finos metalúrgicos (Angeles, 2003), gaseificação de biomassa (Shie et al., 2011), tratamento de resíduos (Rutberg, 2003) e em reforma de gases contaminantes (Oda, 2003), sendo que a aplicação relacionada à questão ambiental tem ganho cada vez mais relevância (Godoy, 1997).

Um material que seja exposto à alta temperatura da tocha de plasma térmica, maior que 1000 K, poderá entrar em decomposição. Embora este processo de decomposição possa ser interessante pela estabilidade química dos compostos, a primeira aplicação que se tem é para a decomposição térmica. A utilização da tocha de plasma térmico para esta destinação oferece vantagens (Boulos, Fauchais e Pfender, 1994):

- A temperatura alta causa rápida e completa decomposição do resíduo.
- A alta densidade do plasma permite uma instalação menor quando comparada às outras tecnologias, reduzindo assim o custo e favorecendo a construção de novos reatores, bem como uma rápida inicialização e desligamento do processo.
- O uso de arcos elétricos para gerar a alta temperatura reduz o tratamento de limpeza posterior

do gás.

- É uma alternativa aos métodos que utilizam catalisadores e de tratamento térmico convencional.

Entretanto também apresenta desvantagens (Boulos, Fauchais e Pfender, 1994):

- É uma técnica dedicada que exige investimento tecnológico e de funcionamento.
- Necessita de um grande volume de gás para produção do gás de plasma.
- Apresenta alto consumo de energia elétrica quando comparado com outros sistemas de limpeza.
- Cada processo necessita de parâmetros de operação e geometria de tocha diferentes.

De acordo com Angeles (2003), a classificação das tochas de plasma pode ser feita sob alguns aspectos básicos, entre eles, a mais generalizada, é a maneira de produção do plasma como encontrado em tochas de arco elétrico com corrente contínua, de arco elétrico com corrente alternada, de plasma de rádio frequência, de plasma de alta frequência e de plasma de ultra-alta frequência. Comumente, para conversão, é utilizada a tocha de arco elétrico com corrente contínua.

Pode-se citar como característica da tocha de plasma a alta temperatura, na faixa de  $10^3$  K ou maior, alta eficiência de conversão de energia elétrica em térmica, podendo alcançar até 95%, utilização com qualquer gás de trabalho como oxidantes, neutros ou redutores, entalpia de fluxo de plasma alta, densidade de potência alta e condutividade térmica do fluxo de plasma alta (Esibyan, 1978; Marotta, 1991). Em relação aos elementos constituintes da tocha de plasma, pode-se citar os componentes básicos como os eletrodos (cátodo e ânodo), tubo para passagem do gás, câmara de entrada do gás ou câmara de vórtice, sistema de estabilização do arco e sistema de refrigeração dos eletrodos (Coutinho, 2007).

O arco elétrico estabelecido entre os eletrodos é forçado através do canal pelo gás que está sendo pressurizado, este gás é chamado de gás de trabalho ou gás plasmagênico, assim, o arco permanece estabilizado ao longo do eixo da tocha pelo arco confinado e, comumente, o cátodo fica a montante do gás de trabalho e o ânodo a jusante. O gás de trabalho é alimentado através de uma

câmara de vórtice que o rotaciona gerando dois efeitos principais que são a estabilização na coluna do arco no centro do canal da tocha e a rotação da parte radial. O gás é aquecido na passagem através do canal, ionizado e sai da tocha como um jato de plasma alargando-se ligeiramente, isto é, a tocha exerce o papel de um diafragma constringindo a coluna do plasma. Desta forma, surge um gradiente axial de pressão do campo magnético do arco, acelerando o jato de plasma. A camada exterior do gás que percola a coluna do arco mantém-se relativamente fria e atua como isolante elétrico e térmico para o jato de plasma. Neste caso, o revestimento externo de gás resfria intensamente a coluna do arco, aumentando a densidade de corrente e a temperatura do arco confinado (Angeles, 2003).

A Figura 2.7 apresenta uma distribuição em cores típica de temperatura da tocha de plasma.

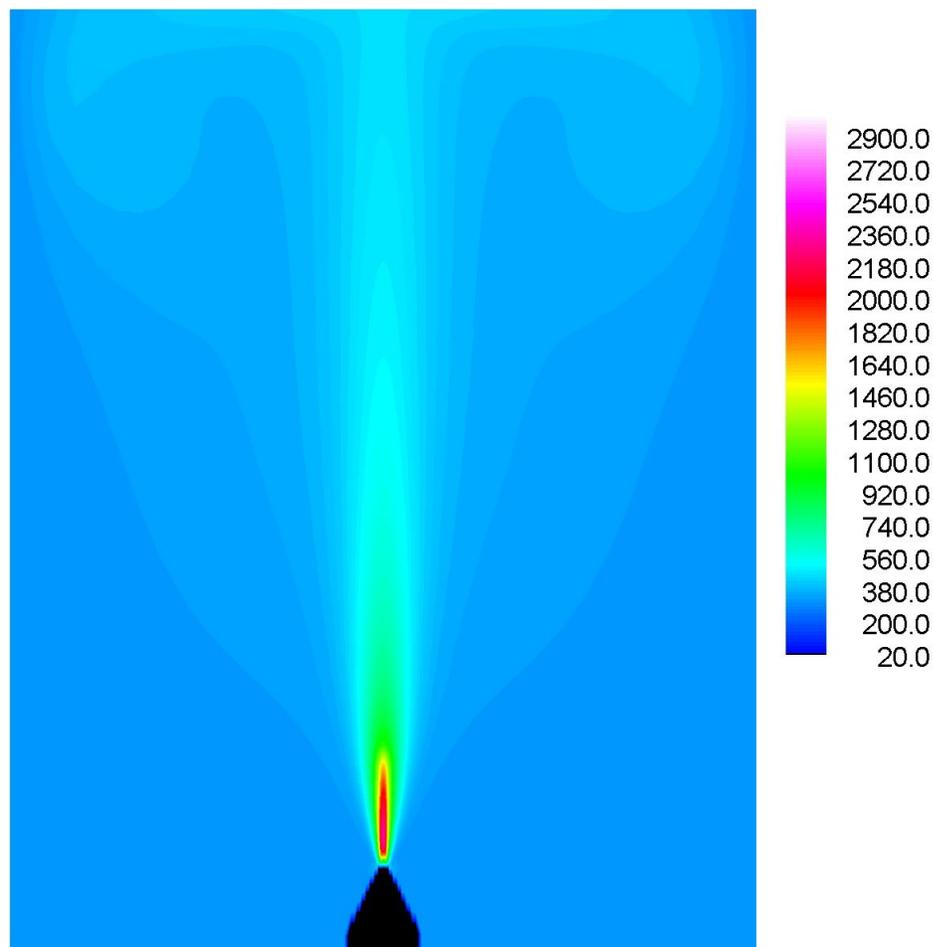


Figura 2.7: Distribuição da temperatura [K] em cores a partir do bocal da tocha em uma câmara (de 50 por 150 mm), (adaptado de Alves et al., 2009).

### 2.6.1 Arco não-transferido, transferido e sobreposto

É comum utilizar uma classificação entre as tochas de plasmas que são dependentes do arco elétrico utilizado como o arco não-transferido, transferido e sobreposto ou misto.

No arco não-transferido, o equipamento opera com o cátodo e o ânodo no mesmo corpo, daí surge o nome (Godoy, 2001), apresenta comumente geometria tubular e concêntrica e sua durabilidade é afetada diretamente pela erosão do cátodo (Baratelli, 2004). Normalmente, este tipo de arco é usado para fusão, refino, redução, decomposição e pirólise (Junior, 2006).

Para o caso de arco transferido, o equipamento opera com um eletrodo na tocha (usualmente o cátodo) e o outro eletrodo no material a ser trabalhado (Godoy, 2001), ou seja, o arco se faz na tocha e fecha em um material externo e, geralmente, este tipo de arco elétrico é utilizado para corte de metais (Coutinho, 2007). A Figura 2.8 apresenta tochas com arco não-transferido e transferido.

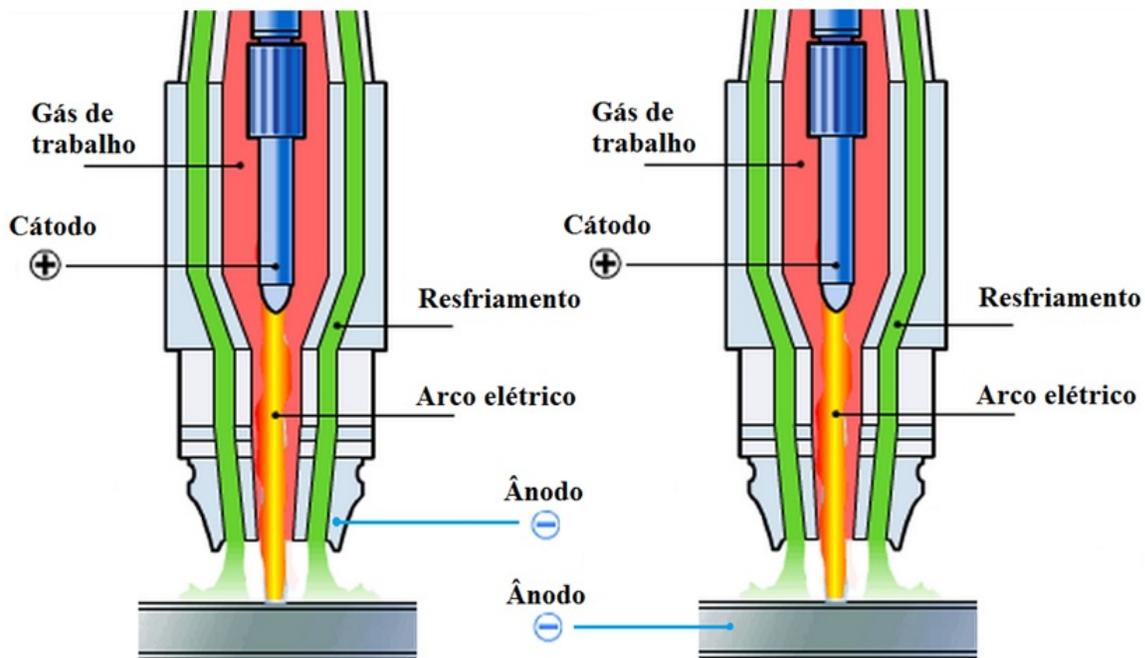


Figura 2.8: Tocha de arco não-transferido e transferido.

No último caso, o arco sobreposto ou misto é definido como duas ou mais tochas combinadas e interligadas por uma fonte de potência, normalmente alternada, através do plasma. Estas tochas

podem ser ligadas aos pares ou ainda formando um sistema trifásico. Este tipo de arco utilizado não é muito comum e é usual quando potências altas são exigidas (Coutinho, 2007; Junior, 2006).

## 2.7 Tecnologias de limpeza de gás convencionais

O processo de controle de poluição é dividido em três categorias. A primeira é o descarte de resíduos sólidos em aterros sanitários ou ao meio ambiente, no caso dos resíduos líquidos e gasosos. A segunda é a conversão de produtos perigosos em inofensivos como  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$ ,  $O_2$ , entre outros, e então descartados em aterros sanitários ou lançados ao meio ambiente. A terceira é a conversão de resíduos em produtos de maior valor agregado tais como materiais de construção, fertilizantes agrícolas, gases combustíveis, entre outros (Chang, 2003).

Existem vários equipamentos físicos ou mecânicos de limpeza de gás para remoção de alcatrão e material particulado gerados pela gaseificação de biomassa. A classificação destes equipamentos é baseada em suas aplicações, sendo divididas em duas categorias: seco e úmido. Nos equipamentos tipo seco estão o ciclone, separador de partículas rotacional, precipitador eletrostático, filtros, adsorvedores, entre outros. Já nos equipamentos tipo úmido estão a torre de spray, torre de lavagem, tubo de Venturi, precipitadores eletrostáticos úmidos, ciclone úmido, entre outros. Genericamente, a limpeza do gás realizada por meio de equipamentos tipo seco ocorre em temperatura próxima a  $773\text{ K}$  enquanto que a temperatura do gás para equipamentos tipo úmido está na faixa  $293$  a  $333\text{ K}$ . (Anis e Zainal, 2011).

Algumas tecnologias de limpeza de gás convencionais serão detalhadas: ciclone, filtro de manga, filtro de leito granular, lavador úmido, torre de lavagem, lavador Venturi e precipitador eletrostático.

### **Ciclone**

O ciclone foi considerado o principal dispositivo de limpeza de gás para o desenvolvimento das tecnologias de combustão a partir do carvão e é considerado um equipamento clássico na coleta de material particulado. Dentre as diversas possibilidades de separadores que podem atuar em altas temperaturas, o ciclone se destaca por possuir baixo investimento de construção e manutenção. Capaz de trabalhar com diversos valores de temperatura e tamanho de particulados, sua performance é

associada a alta eficiência, robustez e confiabilidade para o sistema de limpeza. O princípio básico de funcionamento de um ciclone é quando o gás, carregado de partículas, entra em um vórtice onde a inércia e a gravidade fazem com que as partículas sejam separadas da corrente gasosa e, então, coletadas em algum reservatório ou dispositivo para retirada (Cortés e Gil, 2007).

Atualmente, é bastante conhecida a tecnologia para construção de ciclones e, geralmente, para aumentar a eficiência de separação com diferentes tamanhos de partículas, pode-se utilizar vários estágios de ciclones, os multiciclones. Apesar disso, sabe-se que são incapazes de fornecer gás limpo com a qualidade desejada. Sendo assim, a função básica do ciclone é efetuar uma pré-limpeza dos gases que deverão ser limpos em outros equipamentos para separar as partículas menores como filtros, lavadores úmidos e precipitadores eletrostáticos que podem ser instalados após a saída do ciclone (Kumar, Jones e Hanna, 2009).

Por mais que seja uma tecnologia bastante utilizada, uma grande gama de pesquisas ainda são realizadas para aprimorar os ciclones. Uma tecnologia utilizada para aumentar a eficiência de coleta de partículas mais finas é a instalação de eletrodos na parte axial do ciclone, sendo este dispositivo chamado de eletrociclone, no qual os íons emitidos pela alta voltagem carregam as partículas e, como estão sujeitas ao campo elétrico juntamente com a força centrífuga, são separadas do gás de forma mais eficiente que a do ciclone convencional (Jazorek, Krupa e Czech, 2007).

## **Filtro**

Esta tecnologia permite que o gás passe pelos poros da malha do filtro e, concomitantemente, seja coletado o material particulado que possui diâmetro de 0,5 a 100  $\mu m$ . Há grande perda de carga pelo fato da malha do filtro ser pequena, podendo causar até entupimento (Kumar, Jones, Hanna, 2009). Os filtros mais utilizados são os filtros de manga e o de leito granular (Sánchez, 2010), além dos filtros elétricos de barreira (Jazorek, Krupa e Czech, 2007).

O filtro de manga pode operar até 308  $K$  e é constituído basicamente de tecidos que coletam os particulados. Estes tecidos podem ser de prolipropileno, poliamida alifática, poliéster, entre outros (Kum, Jones e Hanna, 2009). Segundo Bizzo (2010), uma grande desvantagem da utilização deste tipo de filtro é a intolerância ao alcatrão, ou seja, somente é recomendado quando não houver condensação de alcatrão.

O filtro de leito granular é composto por grãos mineiras e pode suportar temperaturas mai-

ores que o filtro de manga (Bizzo, 2010) ou esferas cerâmicas juntamente com serragem (Kumar, Jones e Hanna, 2009). Entretanto, esta tecnologia não é muito pesquisada em escalas industriais principalmente na área de gaseificação (Bizzo, 2010).

### **Lavador úmido**

O lavador úmido é uma tecnologia importante para a limpeza de gás. Seu funcionamento se dá pela utilização de algum líquido conveniente em contato com o gás para condensar o alcatrão e, simultaneamente, remover o material particulado (Anis e Zainal, 2011).

### **Torre de lavagem**

De acordo com Sánchez (2010), pelo fato de atuar a força gravitacional no líquido da torre de lavagem, estes dispositivos são cilíndricos e instalados verticalmente, sendo que a corrente de gás entra na parte inferior da torre e, por meio da lavagem produzida por bicos nebulizadores, ocorre a limpeza do gás.

### **Lavador Venturi**

Basicamente, o funcionamento deste dispositivo se dá pela colisão entre gotas e partículas na garganta do Venturi, sendo que a eficiência aumenta diretamente com a velocidade do gás na garganta, proporcionando assim a turbulência necessária. Por mais que o consumo de energia seja perdido por meio da perda de carga provocada pela aceleração do gás e líquido na região da garganta, estes equipamentos possuem eficiências altas para partículas de 0,3 a 0,5  $\mu m$  (Bizzo, 2010).

### **Precipitador eletrostático**

O precipitador eletrostático aplica voltagem elétrica para carregar as partículas presente na corrente de gás e então separá-las do material particulado. Este processo consiste em realizar o carregamento elétrico das partículas, coletá-las e, então, removê-las. A eficiência de separação depende da resistividade da partícula e conteúdo de enxofre e metais alcalinos presentes na corrente de gás. Estes dispositivos são mais utilizados para fins de larga escala, pois são geometricamente grandes e precisam de grande investimento (Kumar, Jones e Hanna, 2009).

Os precipitadores eletrostáticos secos são ineficientes para remoção de alcatrão, isto se deve

ao fato do alcatrão se condensar nos eletrodos dos precipitadores eletrostáticos secos e, devido a isso, causar danos ao sistema de limpeza. Somente os precipitadores eletrostáticos úmidos podem remover o alcatrão presente no gás de gaseificação de biomassa (Evans e Abatzoglou, 1998).

A Figura 2.9 apresenta a eficiência de coleta de partículas para alguns equipamentos em função do tamanho da partícula.

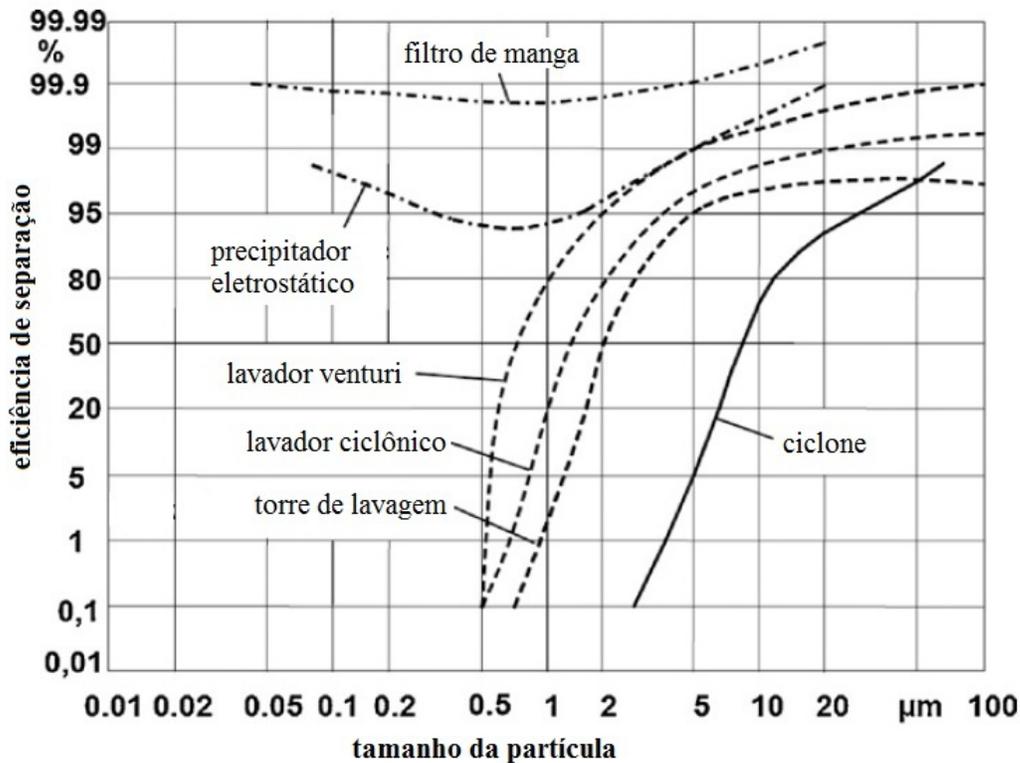


Figura 2.9: Eficiência de coleta de particulados para alguns equipamentos de limpeza de gás adaptado de Thambimuthu (1993).

A Tabela 2.8 apresenta a eficiência de coleta de alcatrão e particulados para alguns equipamentos de acordo com diversos autores.

Tabela 2.8: Redução de particulados e alcatrão em equipamentos convencionais de limpeza. Nota: (i) Hasler e Nussbaumer (1999); (ii) Cortéz e Gil (2007); (iii) Reijnen e Brakel (1984); (iv) Hasler e Nussbaumer (2000); (v) Kumar, Jones e Hanna (2009); (vi) Hasler, Nussbaumer e Buehler (1997); (vii) Teixeira, Primo e Lora (2008); (viii) Bologna et al. (2008); (ix) Moreira e Andersen (2011); (x) Ham e Kim (2008); (xi) Laurence e Ashenafi (2012).

Tecnologia	Temperatura [ <i>K</i> ]	Pressão [ <i>bar</i> ]	Redução de particulados [%]	Redução de alcatrão [%]
Filtro com leito de areia	283 – 293(i)		70 – 99(i)	50 – 97(i)
Filtro de manga	403(i)	1.10 <sup>3</sup> – 6.10 <sup>3</sup> (ix)	75 – 95(i)	< 25(i)
Torre de lavagem	323 – 333(iv)	20 – 200(v)	60 – 98(iv)	10 – 25(i)
Lavador úmido	< 373(v)	25 – 250(v)	95 – 99(v)	< 60
Lavador Venturi	283 – 373(xi)	30 – 200(vii)	98, 8(vii)	50 – 90(vi)
Atomizador rotacional	< 373(i)		95 – 99(i)	
Precipitador eletrostático			97 – 99(viii)	
Precipitador eletrostático úmido	313 – 323(i)		> 99(i)	< 60(i)
Filtro de barreira	403(i)		70 – 90(i)	< 50(i)
Separador rotacional	403(i)		85 – 90(i)	30 – 70(i)
Ciclone	373 – 1073(xi)	< 10(iii)	> 99(i)	

## 2.8 Tecnologia de limpeza de gás utilizando reforma a plasma

Estudos demonstram que temperaturas acima de 1273 K são necessários para destruir os compostos que formam o alcatrão (Milne, Evans e Abatzoglou, 1998). Sendo assim, as possíveis reações que ocorrem durante a decomposição térmica do alcatrão estão listadas na Tabela 2.9.

Tabela 2.9: Reações de decomposição térmica do alcatrão.  $C_nH_y$  representa um hidrocarboneto com cadeia maior que  $C_mH_y$  onde p, q e x são números molares, (adaptado de Devi, Ptasinski e Janssen, 2005).

Nome	Reação
Craqueamento	$pC_nH_x \rightarrow qC_mH_y + rH_2$
Reforma a vapor	$C_nH_x + nH_2O \rightarrow (n + (x/2))H_2 + nCO$
Reforma seca	$C_nH_x + nCO_2 \rightarrow (x/2)H_2 + 2nCO$
Formação de carbono	$C_nH_x \rightarrow nC + (x/2)H_2$

O ponto fundamental para o entendimento da decomposição do alcatrão via processos térmicos são suas propriedades químicas e físicas. A pesquisa de redução do teor de alcatrão encontrado em gases é comumente abordada em dois grupos distintos. O primeiro é a seleção e trabalho com um dos componentes traços que representam o alcatrão como tolueno, naftaleno, entre outros. O segundo é considerar o alcatrão como um só composto, conhecida como uma mistura de hidrocarbonetos pesados (Chunshan e Suzuki, 2009).

A utilização de equipamentos convencionais não têm sido muito efetivos para a remoção do alcatrão devido aos aerossóis, partículas formadas pela condensação do alcatrão, menores que 1  $\mu m$  de diâmetro. Por causa da viscosidade do alcatrão, tais partículas se aderem às paredes dos equipamentos (por exemplo, na tubulação ou entupindo os filtros), diminuindo a eficiência de remoção de alcatrão (Kum, Jones e Hanna, 2009). Segundo Bizzo (2010), a utilização dos equipamentos convencionais para a remoção de partículas tem conseguido pouco sucesso quando se refere a remoção de alcatrão.

Diante do cenário apresentado, ao invés de remoção de particulados e alcatrão, uma alternativa ao tratamento de limpeza é realizar a transformação destes contaminantes em gás, onde a aplicação do plasma torna-se de interesse.

Pode-se classificar a reforma do gás utilizando a aplicação da tecnologia a plasma em três categorias. A primeira é chamada de método de plasma remoto, onde os componentes do plasma estão a alta pressão e então são utilizados para reforma. A segunda é chamada de método indireto de radiação ou plasma, onde pressões altas e baixas são usadas para gerar radiação ultravioleta, feixe de elétrons ou radiação gama para a reforma de gases. Na terceira está a descarga corona AC, DC ou pulsantes. Estas são geradas dentro do gás que será reformado e tratado diretamente pelo plasma. Convencionalmente, os gases não tratados são misturados e reformados por sistemas integrados complexos de controle para remover os poluentes. Devido a esta dificuldade, a principal vantagem de utilizar a tecnologia de plasma é simplificar estes sistemas de tratamentos (Chang, 1997).

A tecnologia de reforma de gás por meio de plasma pode ser utilizada na reforma de biogás, que é o produto da decomposição de matéria orgânica proveniente de diferentes fontes por microrganismos em condições anaeróbicas. Nesta reforma não há necessidade do emprego de catalisadores e também de pré-tratamento dos gases para remoção de compostos de enxofre, reduzindo assim custos operacionais e simplificando o processo (Khalaf, Carasek e Debacher, 2011). Também há reforma de metano visando a produção de gás de síntese (Justiano et al., 2010; Czernichoswaski, 2002) e hidrogênio (Chun e Kim, 2007; Deminsky et al., 2002) e reforma de dióxido de carbono para produção de gás de síntese (Khalaf, Carasek e Debacher, 2011).

Pesquisadores já demonstraram que o alcatrão é facilmente decomposto por descargas coronas (Han e Kim, 2008). De acordo com Labanca (2007), o estado de alta energia do plasma excita as moléculas, deixando-as a um nível energético elevado e prontas para reagirem na busca de uma situação de mais baixa energia, promovendo assim a decomposição dos elementos contaminantes.

A tecnologia de reforma de gás pobre utilizando tocha de plasma é uma alternativa à tecnologia convencional de reforma a vapor para produção de hidrogênio, sendo esta última a mais utilizada atualmente. A reforma a plasma pode ser utilizada em uma grande variedade de combustíveis como em alcoóis, diesel, resíduos de biomassas, gás natural, dentre outros (Liu, Song e Subramani, 2010) e, segundo Han e Kim (2008), a tocha de plasma pode ser adaptada para uma instalação já existente, como por exemplo, em um tubo por onde passam os gases.

Segundo o trabalho de Anis e Zainal (2011), o craqueamento de alcatrão por meio da reforma a plasma tem sido amplamente investigado para controle de poluição devido a fácil remoção de componentes como o  $CH_4$ ,  $SO_2$  e  $NO_x$ . Além desta vantagem, a reforma a plasma pode ser uti-

lizada como alternativa aos métodos que utilizam catalisadores e tratamento térmico convencional.

De acordo com o trabalho de Fourcault, Marias e Michon (2010), simulações demonstraram que a viabilidade de transformar tolueno e naftaleno em hidrocarbonetos mais leves por meio de tocha de plasma podem alcançar taxas de conversão de 99,9 e 96,7 %, respectivamente. Já no campo experimental utilizando plasma de micro-ondas, os valores apresentados da conversão de hidrocarbonetos pesados em hidrocarbonetos mais leves por meio da reforma do gás de gaseificação estão apresentados na Tabela 2.10, influenciando diretamente na composição do gás de gaseificação.

Tabela 2.10: Eficiência de conversão de hidrocarbonetos pesados em leves de acordo com o gás de trabalho utilizado.

Referência	Gás de trabalho	Eficiência de conversão de hidrocarbonetos pesados em leves [%]
van Heesch et al. (2000)	$N_2$	50 – 77
Nair et al. (2003)	$N_2$	8 – 43
Tao et al. (2003)	$N_2$	57
	$CO_2$	59,4

Dentre os diversos gases de trabalho que podem ser usados para gerar o plasma estão os gases oxidantes, redutores ou inertes, no qual o melhor resultado encontrado experimentalmente e por meio de modelagem numérica para o craqueamento de naftaleno foi o nitrogênio (Bityurin et al., 2009).

Os tipos de gases tratados pelo reformador a plasma está detalhado na Tabela 2.11.

Tabela 2.11: Tipo de gás tratado pela reformador a plasma, (adaptado de Chang, 2003). VOCs são os compostos orgânicos voláteis, PFCs são compostos perfluorados, ODS são substâncias que destroem o ozônio, (i) plasma não-térmicos, (ii) plasmas térmicos e (iii) destruição de gases.

Reformador	Gás tratado
Feixe de elétrons (i)	Gases ácidos e VOCs
Descarga elétrica (superfície) (i)	Oxidação de VOCs ou gases ácidos
Descarga elétrica (ferroelétrico) (i)	PFCs e oxidação de VOCs
Descarga corona (ii)	VOCs
Descarga de energia (ii)	Gases ácidos
Descarga por tubo capilar (ii)	VOCs
Fluxo estabilidade de corona (ii)	VOCs e gases ácidos e tóxicos
Arco ou tocha de plasma (ii)	(iii)VOCs, ODS e gases tóxicos
Descarga de radiofrequência	(iii)VOCs e ODS
Descarga de micro-ondas	(iii)VOCs e ODS

Com o cenário apresentado e a busca pela redução de poluição e conversão de resíduos em produtos de maiores valores agregados, a reforma do gás de gaseificação por meio da tecnologia da tocha de plasma visa competir com as tecnologias convencionais de reforma e de tratamento de gases.

### **3 CÁLCULOS PRELIMINARES**

Este capítulo visa inserir alguns conceitos e dados experimentais preliminares para os ensaios de gaseificação convencional e gaseificação com reforma de gás utilizando tocha de plasma, bem como a compreensão da tocha de plasma e o sistema de reforma de gás.

#### **3.1 Análise convectiva e entálpica do gás de trabalho**

A análise convectiva foi realizada para obter a temperatura em função da distância da tocha de plasma e, a partir destes valores, verificar se a temperatura era alta o suficiente para reformar o gás de gaseificação. Já a entalpia do gás de trabalho foi calculada a fim de obter o valor energético inserido no gás de plasma para a reforma do gás de gaseificação e, posteriormente, para o balanço de energia do sistema de reforma.

Inicialmente, foi realizada uma análise preliminar convectiva na tocha de plasma para caracterizar o gradiente axial de temperatura. Também foi necessário o cálculo de entalpia do gás de trabalho, gás nitrogênio que alimenta a tocha, para obter o valor de energia do plasma e para o balanço de energia do processo.

Foi construída uma câmara, para a análise convectiva da tocha de plasma, onde foi introduzida a tocha de plasma e um termopar tipo S a uma distância conhecida, a Figura 3.1 apresenta a foto da câmara e posição da tocha de plasma juntamente com o termopar.

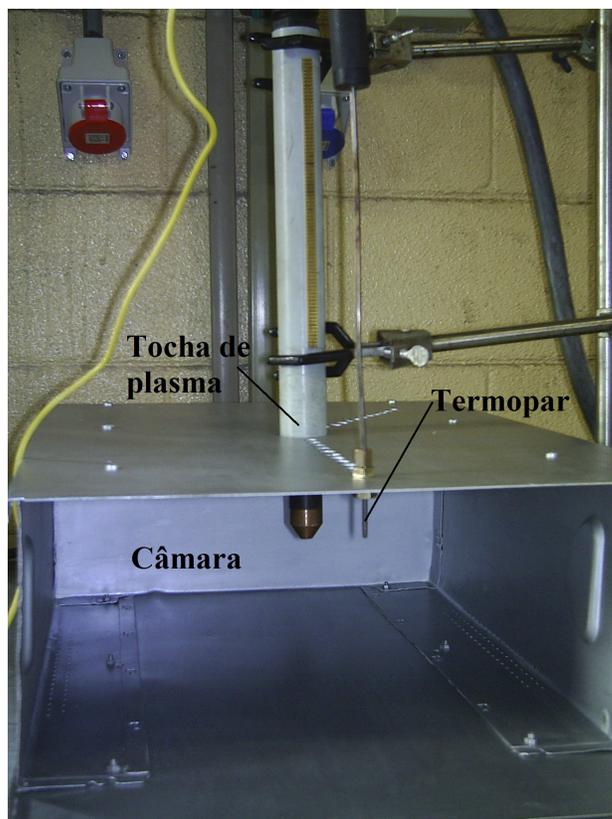


Figura 3.1: Câmara de análise convectiva.

Por meio da leitura do termopar, quando posicionado a aproximadamente  $15\text{ mm}$  de distância do bocal da tocha, observou-se que a temperatura não foi superior a  $100^{\circ}\text{C}$ . Isto se deve a camada exterior do gás que percola a coluna do arco e atua como isolante elétrico e térmico do jato de plasma, mantendo assim a integridade do sistema. Por este motivo, as medidas de temperaturas e distâncias foram coletadas em função da distância a partir do bocal da tocha como apresentado pelo diagrama da Figura 3.2. Já a Figura 3.3 apresenta o gráfico com os dados coletados. Não foi possível obter temperaturas para distâncias mais próximas das que apresentadas na figura, pois o termopar tipo S não suporta temperaturas maiores que  $1753\text{ K}$ .

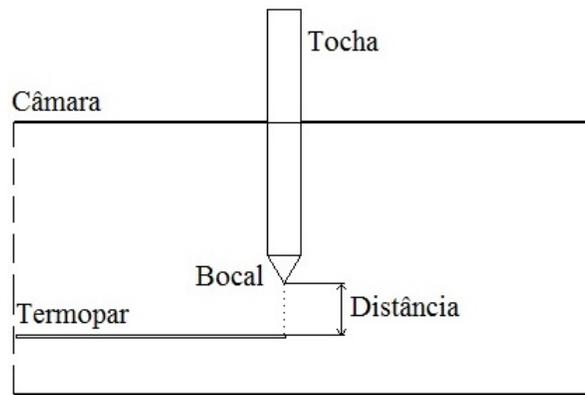


Figura 3.2: Diagrama de coleta de temperatura em função da distância a partir do bocal da tocha.

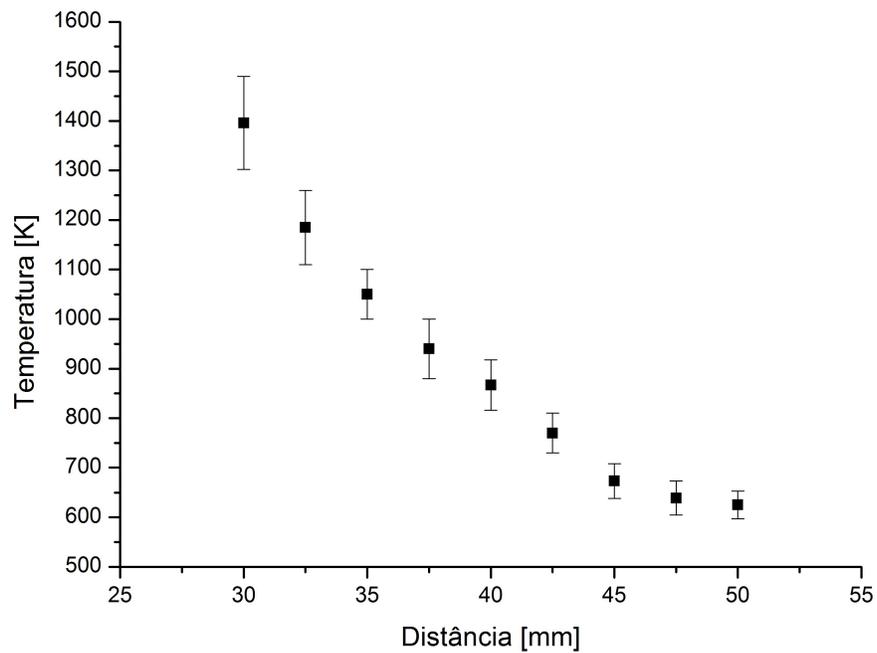


Figura 3.3: Gradiente de temperatura do plasma.

A entalpia do gás de trabalho ( $N_2$ ) foi calculada de acordo com a norma ASTM E341-08 (Standard Practice for Measuring Plasma Arc Gas Enthalpy by Energy Balance). Para este procedimento, as energias de entrada e saída consideradas foram a da fonte de alimentação e as perdas

pelos consumíveis e pelo gás de trabalho, respectivamente, resultando no seguinte balanço:

$$\text{Energia de entrada} - \text{Energia de saída} = \text{Energia do gás no plasma} \quad (3.1)$$

logo:

$$EI - M_{Cu}H_{Cu} = W_g(H_g - H_{in}) \quad (3.2)$$

em que  $E$  é a voltagem da tocha de plasma [V],  $I$  é a corrente da tocha de plasma [A],  $M_{Cu}$  é a taxa de perda de massa do cobre no consumível [ $kg.s^{-1}$ ],  $H_{Cu}$  é o calor de vaporização do cobre no consumível (eletrodo) [ $kJ.kg^{-1}$ ],  $W_g$  é a vazão mássica do gás de trabalho [ $kg.s^{-1}$ ],  $H_{in}$  é a entalpia de entrada do gás de trabalho [ $kJ.kg^{-1}$ ] e  $H_g$  é a entalpia do plasma [ $kJ.kg^{-1}$ ].

A perda de massa dos consumíveis está na Tabela 3.1. Os consumíveis são os componentes do bocal da tocha e responsáveis pela ignição, estabilização e funcionamento da tocha de plasma. Detalhes adicionais sobre os consumíveis podem ser encontrados no capítulo materiais e métodos, no item consumíveis da seção sistema de tocha a plasma.

Tabela 3.1: Perda de massa dos consumíveis

Ensaio	Massa do bico		Massa do eletrodo	
	Novo [g]	Utilizado [g]	Novo [g]	Utilizado [g]
1	14,42	14,34	19,58	19,48
2	14,42	14,30	19,57	19,38
3	14,46	14,33	19,58	19,43
Duração de cada ensaio [s]		1500		

A Tabela 3.2 apresenta o resultado final para o cálculo da entalpia do gás de plasma, nos quais os valores de voltagem e corrente foram obtidos pelo manual de operação da fonte de alimentação e da tocha de plasma.

Tabela 3.2: Entalpia do gás de plasma

Parâmetro	Valor	Unidade
$E$	150	$V$
$I$	80	$A$
$H_{Cu}$	4721	$kJ.kg^{-1}$
$M_{Cu}$	$1,688.10^{-7}$	$kJ.s^{-1}$
$W_g$	$2,5.10^{-3}$	$kJ.s^{-1}$
$H_{in}$	309	$kJ.kg^{-1}$
$H_g$	5041	$kJ.kg^{-1}$

### 3.2 Balanço de massa e balanço de entalpia

Nesta seção é detalhada o balanço de massa e de entalpia com o objetivo final de obter a vazão de gás na tocha e a temperatura de reforma do gás de gaseificação. Para isto, foram utilizados os dados obtidos nos trabalhos de Pellegrino (2006), Behainne (1999), Incropera et al. (2006) e Ražnjević (1970) para os cálculos a seguir.

O balanço de massa e o balanço de entalpia foram realizados considerando o tubo convergente-divergente como volume de controle, apresentado na Figura 3.4.

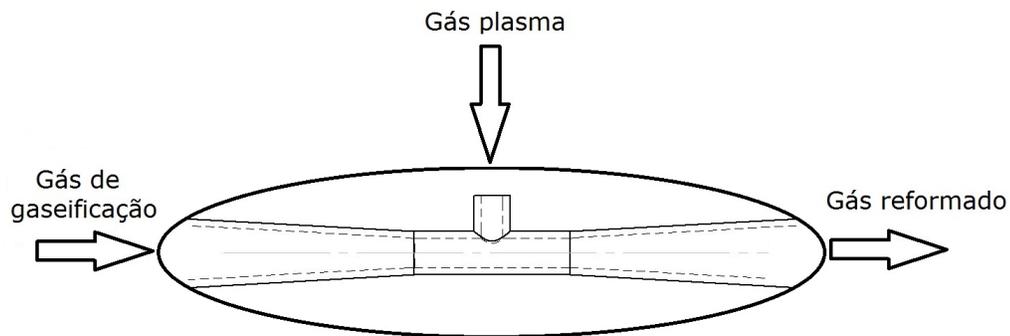


Figura 3.4: Tubo convergente-divergente utilizado como volume de controle para os cálculos do balanço de massa e balanço de entalpia.

Matematicamente, o balanço de massa utilizando o tubo convergente-divergente como vo-

lume de controle foi:

$$\dot{m}_p + \dot{m}_g = \dot{m}_r \quad (3.3)$$

em que  $\dot{m}_p$  é a vazão mássica do plasma [ $kg.h^{-1}$ ],  $\dot{m}_g$  é a vazão mássica do gás de gaseificação [ $kg.h^{-1}$ ] e  $\dot{m}_r$  é a vazão mássica de reforma de gás [ $kg.h^{-1}$ ].

O balanço de entalpia sobre o tubo é:

$$\Delta H_p + \Delta H_g = \Delta H_r \quad (3.4)$$

em que  $\Delta H_p$  é a variação de entalpia no plasma [ $kJ.h^{-1}$ ],  $\Delta H_g$  é a variação de entalpia do gás de gaseificação [ $kJ.h^{-1}$ ] e  $\Delta H_r$  é a variação de entalpia na reforma [ $kJ.h^{-1}$ ].

A Tabela 3.3 apresenta a vazão mássica do gás de gaseificação e a Tabela 3.4 a vazão mássica da tocha de plasma.

Tabela 3.3: Vazão mássica do gás de gaseificação

	Parâmetro	Valor	Unidade
Vazão volumétrica do gás de gaseificação	$\dot{V}_g$	15,00	$Nm^3.h^{-1}$
Densidade do gás de gaseificação	$\rho_g$	0,63	$kg.m^{-3}$
Vazão mássica do gás de gaseificação	$\dot{m}_g$	9,50	$kg.h^{-1}$

Tabela 3.4: Vazão mássica do plasma

	Parâmetro	Valor	Unidade
Vazão volumétrica do plasma	$\dot{V}_p$	7,70	$Nm^3.h^{-1}$
Densidade do gás de trabalho	$\rho_p$	6,32	$kg.m^{-3}$
Vazão mássica do plasma	$\dot{m}_p$	48,50	$kg.h^{-1}$

Portanto, de acordo com a Equação (3.3),  $\dot{m}_r = 58,00 \text{ kg.h}^{-1}$ .

A variação da entalpia do plasma está calculada na Tabela 3.5 sendo que a temperatura do

plasma foi calculada da seguinte maneira:

$$T_p = \frac{H_g}{C_{p,N_2}} \quad (3.5)$$

Tabela 3.5: Variação de entalpia do plasma.

	Parâmetro	Valor	Unidade
Vazão mássica do plasma	$\dot{m}_p$	48,5	$kg.h^{-1}$
Calor específico do $N_2$	$C_{p,N_2}$	1,04	$kJ.(kg.K)^{-1}$
Temperatura do plasma	$T_p$	4847	$K$
Temperatura ambiente	$T_{amb}$	298	$K$
Variação de entalpia do plasma	$\Delta H_p$	229461	$kJ.h^{-1}$

A entalpia do gás de gaseificação ( $\Delta H_g$ ) é calculada de acordo com a Equação (3.11).

$$\begin{aligned} \Delta H_g = & C_{CO}\Delta H_{CO} + C_{H_2}\Delta H_{H_2} + C_{N_2}\Delta H_{N_2} + C_{O_2}\Delta H_{O_2} \\ & + C_{CO_2}\Delta H_{CO_2} + C_{CH_4}\Delta H_{CH_4} \end{aligned} \quad (3.6)$$

em que  $C_i$  é a concentração molar do componente  $i$  no gás de gaseificação [%] e  $\Delta H_i$  é a variação de entalpia do componente  $i$  [ $kJ.h^{-1}$ ].

A entalpia de cada componente  $i$  do gás de gaseificação  $\Delta H_i$  é:

$$\Delta H_i = \dot{m}_g C_{p,i} (T_g - T_{amb}) \quad (3.7)$$

em que  $\dot{m}_g$  é a vazão mássica do gás de gaseificação [ $kg.h^{-1}$ ],  $T_g$  é a temperatura do gás de gaseificação [ $K$ ],  $T_{amb}$  é a temperatura ambiente [ $K$ ] e  $C_{p,i}$  é o calor específico a volume constante do componente  $i$  [ $kJ.(kgK)^{-1}$ ].

A Tabela 3.6 mostra a variação de entalpia de gaseificação.

Tabela 3.6: Variação de entalpia de gaseificação.

	Parâmetro	Valor	Unidade
Vazão volumétrica de gaseificação	$\dot{V}_g$	15	$Nm^3.h^{-1}$
Densidade do gás de gaseificação	$\rho_g$	0,63	$kg.m^{-3}$
Vazão mássica de gaseificação	$\dot{m}_g$	9,5	$kg.h^{-1}$
Temperatura do gás de gaseificação	$T_g$	873	$K$
Temperatura ambiente	$T_{amb}$	298	$K$
Concentração de $CO$	$C_{CO}$	0,0365	
Concentração de $H_2$	$C_{H_2}$	0,0678	
Concentração de $N_2$	$C_{N_2}$	0,7098	
Concentração de $O_2$	$C_{O_2}$	0,0020	
Concentração de $CO_2$	$C_{CO_2}$	0,1739	
Concentração de $CH_4$	$C_{CH_4}$	0,0100	
Calor específico de $CO$	$C_{p,CO}$	1,60	$kJ.(kgK)^{-1}$
Calor específico de $H_2$	$C_{p,H_2}$	14,42	$kJ.(kgK)^{-1}$
Calor específico de $N_2$	$C_{p,N_2}$	1,04	$kJ.(kgK)^{-1}$
Calor específico de $O_2$	$C_{p,O_2}$	0,92	$kJ.(kgK)^{-1}$
Calor específico de $CO_2$	$C_{p,CO_2}$	0,46	$kJ.(kgK)^{-1}$
Calor específico de $CH_4$	$C_{p,CH_4}$	2,24	$kJ.(kgK)^{-1}$
Variação de entalpia de gaseificação	$\Delta H_g$	10325	$[kJ.h^{-1}]$

Portanto, de acordo com a Equação (3.4),  $\Delta H_r = 239786 \text{ kJ.h}^{-1}$ .

A partir dos dados obtidos, pode-se calcular a temperatura de reforma ( $T_r$ ) a partir da variação de entalpia na reforma:

$$\Delta H_r = \dot{m}_r C_{p,r} (T_r - T_{amb}) \quad (3.8)$$

ou seja,

$$T_r = \frac{\Delta H_r}{\dot{m}_r C_{p,r}} + T_{amb} \quad (3.9)$$

em que  $C_{p,r}$  é o calor específico a pressão constante da reforma de gás [ $kJ.(kgK)^{-1}$ ] calculado conforme:

$$C_{p,r} = C_{H_2} C_{p,H_2} + C_{CO} C_{p,CO} + C_{N_2} C_{p,N_2} \quad (3.10)$$

A Tabela 3.7 apresenta os dados estimados do calor específico de reforma para uma razão específica de  $H_2/CO$ .

Tabela 3.7: Calor específico de reforma.

	Parâmetro	Valor	Unidade
Concentração de $H_2$	$C_{H_2}$	0,075	
Concentração de $CO$	$C_{N_2}$	0,075	
Concentração de $N_2$	$C_{O_2}$	0,85	
Calor específico de $H_2$	$C_{p,H_2}$	1,60	$kJ.(kgK)^{-1}$
Calor específico de $CO$	$C_{p,CO}$	14,42	$kJ.(kgK)^{-1}$
Calor específico de $N_2$	$C_{p,N_2}$	1,04	$kJ.(kgK)^{-1}$

Portanto, de acordo com a Equação (3.10),  $C_{p,r} = 2,08 \text{ kJ.(kgK)}^{-1}$ .

A Tabela 3.8 apresenta os valores calculados de temperatura da reforma de gás de gaseificação em função da vazão de gaseificação e da razão  $H_2/CO$  estimada para o gás reformado.

Tabela 3.8: Cálculo da temperatura de reforma de gás de gaseificação em função da vazão do gás de gaseificação e razão  $\frac{H_2}{CO}$ .

Vazão de gaseificação [ $Nm^3.h^{-1}$ ]	$\frac{H_2}{CO}$	Temperatura de reforma [ $K$ ]
6	0,1	3689
	0,3	3136
	0,5	2827
8	0,1	3628
	0,3	3085
	0,5	2781
10	0,1	3570
	0,3	3036
	0,5	2738
12	0,1	3514
	0,3	2990
	0,5	2696
14	0,1	3461
	0,3	2945
	0,5	2657
16	0,1	3410
	0,3	2903
	0,5	2619
18	0,1	3362
	0,3	2862
	0,5	2583
20	0,1	3315
	0,3	2823
	0,5	2548

### 3.3 Propriedades do escoamento

Esta seção detalha o cálculo da propriedade de escoamento (número de Reynolds) no tubo de saída da gaseificação convencional e na garganta do tubo convergente-divergente durante a reforma do gás de gaseificação utilizando tocha de plasma. Os cálculos foram importantes para conhecer qual o tipo de escoamento presente durante os ensaios.

Para identificar o tipo de escoamento dos gases de gaseificação no tubo na saída do reator, calculou-se o número de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho v d}{\mu} \quad (3.11)$$

em que  $\rho$  é a densidade do fluido a temperatura de trabalho [ $kg.m^{-3}$ ],  $v$  é a velocidade do fluido [ $m.s^{-1}$ ],  $d$  é o diâmetro do tubo [ $m$ ] e  $\mu$  é a viscosidade dinâmica do gás [ $kg.(ms)^{-1}$ ].

A viscosidade de um gás de gaseificação convencional  $\mu_{gás}$  pode ser calculada de acordo com:

$$\mu_{gás} = C_{H_2}\mu_{H_2} + C_{N_2}\mu_{N_2} + C_{CH_4}\mu_{CH_4} + C_{O_2}\mu_{O_2} + C_{CO}\mu_{CO} + C_{CO_2}\mu_{CO_2} \quad (3.12)$$

em que  $\mu_i$  é a viscosidade do componente  $i$  [ $Pa.s$ ]. A Tabela 3.9 apresenta os dados de concentração molar dos componentes e suas respectivas viscosidades dinâmicas.

Tabela 3.9: Concentração molar e viscosidade dos componentes do gás de gaseificação.

	Parâmetro	Valor	Unidade
Concentração de $H_2$	$C_{H_2}$	0,0678	
Concentração de $CO$	$C_{N_2}$	0,0365	
Concentração de $N_2$	$C_{O_2}$	0,7098	
Concentração de $O_2$	$C_{O_2}$	0,0020	
Concentração de $CO_2$	$C_{CO_2}$	0,1739	
Concentração de $CH_4$	$C_{CH_4}$	0,0100	
Viscosidade de $H_2$ a 573,15 K	$\mu_{H_2}$	$13,9.10^{-6}$	$Pa.s$
Viscosidade de $CO$ a 573,15 K	$\mu_{CO}$	$27,9.10^{-6}$	$Pa.s$
Viscosidade de $N_2$ a 673,15 K	$\mu_{N_2}$	$31,1.10^{-6}$	$Pa.s$
Viscosidade de $O_2$ a 673,15 K	$\mu_{O_2}$	$36,9.10^{-6}$	$Pa.s$
Viscosidade de $CO_2$ a 573,15 K	$\mu_{CO_2}$	$26,80.10^{-6}$	$Pa.s$
Viscosidade de $CH_4$ a 653,15 K	$\mu_{CH_4}$	$20,26.10^{-6}$	$Pa.s$

Portanto, utilizando a Equação (3.12) e os dados da Tabela 3.9,  $\mu_{gás} = 28,97.10^{-6} Pa.s$ .

O número de Reynolds calculado na tubulação para o gás de gaseificação está na Tabela 3.10.

Tabela 3.10: Propriedades do escoamento para o gás de gaseificação.

	Parâmetro	Valor	Unidade
Vazão volumétrica de gaseificação	$\dot{V}_g$	15	$Nm^3.h^{-1}$
Diâmetro	$d$	$50,80.10^{-3}$	$m$
Velocidade	$v$	2,05	$m.s^{-1}$
Densidade do gás	$\rho_{gás}$	0,64	$kg.m^{-3}$
Viscosidade dinâmica do gás	$\mu_{gás}$	$2,89.10^{-5}$	$Pa.s$
Reynolds	$Re$	2295	

A Tabela 3.11 apresenta os dados de viscosidade, concentrações dos contaminantes para o gás reformado e densidade para cada componente, sendo que a densidade do gás reformado ( $\rho_{gás,r}$ ) pode ser calculada de acordo com a Equação (3.13).

$$\rho_{gás,r} = C_{H_2}\rho_{H_2} + C_{CO}\rho_{CO} + C_{N_2}\rho_{N_2} \quad (3.13)$$

em que  $\rho_i$  é a densidade do componente  $i$  [ $kg.m^{-3}$ ].

A viscosidade dinâmica do gás reformado  $\mu_{gás,r}$  pode ser calculada como:

$$\mu_{gás,r} = C_{H_2}\mu_{H_2} + C_{CO}\mu_{CO} + C_{N_2}\mu_{N_2} \quad (3.14)$$

Tabela 3.11: Concentrações molares, viscosidades e densidades dos componentes do gás reformado.

	Parâmetro	Valor	Unidade
Concentração de $H_2$	$C_{H_2}$	0,075	
Concentração de $CO$	$C_{N_2}$	0,075	
Concentração de $N_2$	$C_{O_2}$	0,850	
Viscosidade de $H_2$ a 1073, 15 K	$\mu_{H_2}$	$21,00.10^{-6}$	$Pa.s$
Viscosidade de $CO$ a 1073, 15 K	$\mu_{CO}$	$44,32.10^{-6}$	$Pa.s$
Viscosidade de $N_2$ a 1073, 15 K	$\mu_{N_2}$	$36,60.10^{-6}$	$Pa.s$
Densidade de $H_2$ a 1000 K	$\rho_{H_2}$	0,33	$kg.m^{-3}$
Densidade de $CO$ a 1000 K	$\rho_{CO}$	0,42	$kg.m^{-3}$
Densidade de $N_2$ a 1000 K	$\rho_{N_2}$	0,02	$kg.m^{-3}$

Portanto, utilizando a Equação (3.14), a Equação (3.13) e os dados da Tabela 3.11, a viscosidade do gás reformado é  $\mu_{\text{gás,r}} = 36,01 \cdot 10^{-6} \text{ Pas}$  e a densidade gás reformado é  $\rho_{\text{gás,r}} = 0,34 \text{ kg.m}^{-3}$ .

A Tabela 3.12 apresenta as propriedades de escoamento do gás reformado na garganta do tubo.

Tabela 3.12: Propriedades do escoamento na garganta do tubo convergente-divergente.

Parâmetro	Valor	Unidade
Vazão volumétrica de gaseificação	$\dot{V}_g$	15 $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Vazão volumétrica do plasma	$\dot{V}_p$	7,7 $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Vazão volumétrica do gás reformado	$\dot{V}_r$	22,7 $\text{Nm}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Diâmetro da garganta do tubo	$d_g$	31,70 $\cdot 10^{-3} \text{ m}$
Velocidade na garganta	$v_g$	7,98 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
Densidade do gás reformado	$\rho_{\text{gás,r}}$	0,34 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
Viscosidade dinâmica do gás reformado	$\mu_{\text{gás,r}}$	3,60 $\cdot 10^{-5} \text{ Pas}$
Reynolds de reforma	$Re_r$	2413

Portanto, o escoamento na tubulação na saída do reator de gaseificação e na garganta do tubo convergente-divergente está no regime de transição.

### 3.4 Queda de pressão no tubo convergente-divergente

É importante conhecer o valor da queda de pressão no tubo convergente-divergente para verificar a perda de carga no sistema de reforma de gás de gaseificação.

Inicialmente, o diâmetro da garganta do tubo convergente-divergente foi de 30,5 mm. Este diâmetro foi limitado pela análise preliminar convectiva da tocha de plasma que alcançou a temperatura de 1127 K para este valor. O diâmetro da tubulação para instalação do tubo foi 50,80 mm. A queda de pressão no tubo, considerando somente o gás de gaseificação, é dada pela equação de Bernoulli como apresentada pela Equação (3.15).

$$P_1 + \rho_1 g h_1 + \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 = P_2 + \rho_2 g h_2 + \frac{1}{2} \rho_2 v_2^2 \quad (3.15)$$

em que o índice 1 refere-se a tubulação, o índice 2 refere-se a garganta do tubo,  $P$  é a pressão [ $Pa$ ],  $\rho$  é a densidade [ $kg.m^{-3}$ ],  $g$  é a gravidade local [ $m.s^{-2}$ ],  $h$  é a altura equivalente a  $P$  [ $m$ ] e  $v$  é a velocidade do gás [ $m.s^{-1}$ ].

Para este caso, como o eixo de escoamento está a mesma altura:

$$h_1 = h_2 = 0 \quad (3.16)$$

e, utilizando o princípio da continuidade onde  $A_1$  é a área da tubulação [ $m^2$ ] e  $A_2$  é a área da garganta do tubo [ $m^2$ ]:

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (3.17)$$

portanto pode-se calcular a pressão na garganta do tubo:

$$P_2 = P_1 + \frac{1}{2} \rho_1 v_1^2 \left( 1 - \frac{\rho_1 A_1^2}{\rho_2 A_2^2} \right) \quad (3.18)$$

Os valores calculados para a queda de pressão de acordo com as equações anteriores estão na Tabela 3.13.

Tabela 3.13: Propriedades do escoamento para a reforma do gás de gaseificação

Parâmetro	Valor	Unidade
$P_1$	111457	$kPa$
$\rho_1$	0,64	$kg.m^{-3}$
$\rho_2$	0,34	$kg.m^{-3}$
$v_1$	1,37	$m.s^{-1}$
$A_1$	0,002027	$m^2$
$A_2$	0,000707	$m^2$
$P_2$	111448	$kPa$

Por meio das informações da Tabela 3.13, a queda de pressão foi de  $\Delta P = P_1 - P_2 = 34 Pa$  sendo, portanto, insignificante para este trabalho

### 3.5 Conclusões preliminares

Esta seção detalha as principais conclusões a partir dos cálculos realizados neste capítulo.

Inicialmente, foi realizada a análise convectiva da tocha de plasma. Para tanto, a temperatura da tocha foi maior que  $1400\text{ K}$  para distâncias menores que  $30\text{ mm}$  e, a medida que a distância do bocal da tocha e do termopar aumenta (maior que  $30\text{ mm}$ ), a curva de temperatura versus distância se comporta como uma exponencial decrescente.

A taxa de perda de massa no consumível foi de  $1,688.10^{-7}\text{ kJ.kg}^{-1}$ , a entalpia de entrada do plasma foi de  $309\text{ kJ.kg}^{-1}$  e a de saída foi  $5041\text{ kJ.kg}^{-1}$ , uma diferença de entalpia de  $\Delta H = 4732\text{ kJ.kg}^{-1}$ .

A vazão mássica do plasma igual a  $48,50\text{ kg.h}^{-1}$  é cerca de cinco vezes superior quando comparada à vazão mássica de gaseificação,  $9,50\text{ kg.h}^{-1}$ .

A temperatura calculada do plasma foi de  $4847\text{ K}$ .

A grande variação da entalpia calculada na reforma,  $236344\text{ kJ.h}^{-1}$ , se deve principalmente a entalpia do plasma,  $229461\text{ kJ.h}^{-1}$ .

A temperatura de reforma foi de  $2548$  a  $3689\text{ K}$ . Esta temperatura foi calculada dependente da vazão de gaseificação e da relação  $H_2/CO$  que variou entre  $6$  a  $20\text{ Nm}^3.\text{h}^{-1}$  e  $0,1, 0,3, 0,5$ , respectivamente.

Por meio da propriedade de escoamento, observou-se que tanto o gás de gaseificação como o gás de reforma encontram-se no regime de transição.

Por fim, a variação da queda de pressão referente a tubulação e a garganta do tubo convergente-divergente foi  $\Delta P = 34\text{ Pa}$ , ou seja, insignificante.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

### 4.1 Caracterização da biomassa

A biomassa utilizada para gaseificação foi o resíduo de serragem da mistura entre Peroba e Garapeira, obtida na empresa Campsul - Madeira e Alumínio. Esta empresa está localizada na Rodovia Zeferino Vaz, 1752, km 115, Distrito de Barão Geraldo, Campinas, SP. Com esta biomassa, foram realizadas as seguintes análises: granulométrica, imediata, elementar e de poder calorífico.

De acordo com White e Dietsberger (2001), a serragem de Garapeira possui aproximadamente 14,0 % de extrativos e água, 18,7 % de lignina e 63,3 % de holocelulose. A degradação da hemicelulose para esta madeira ocorre normalmente entre as temperaturas de 473 a 533 K e a decomposição completa da celulose ocorre na faixa de temperatura de 573 a 773 K.

#### 4.1.1 Análise granulométrica

Para a determinação da distribuição em fração mássica das partículas do material, foi realizado o estudo da granulometria, com o objetivo de caracterizar os sólidos em sistemas fluidodinâmicos.

Para isto, foi utilizado um vibrador mecânico de peneiras da marca Produteste e modelo T, fabricado pela Granuteste. Seu acionamento é realizado por um vibrador constante que pode comportar 6 peneiras de duas polegadas de altura cada, ou 12 peneiras de uma polegada de altura. As peneiras da Granuteste são padronizadas pela série Tyler de seção circular 0,2 m de diâmetro.

O diâmetro médio das partículas ( $d_p$ ) que compõem o material foi calculado utilizando a Equação (4.1) supondo distribuição normal.

$$d_p = \left( \sum_{m=1}^N \frac{x_p}{d_{p,m}} \right)^{-1} \quad (4.1)$$

onde  $N$  é o número de peneiras utilizadas,  $d_{p,m}$  é diâmetro médio das partículas retidas entre uma

peneira e sua subsequente [mm] e  $x_p$  é fração mássica das partículas com diâmetro médio igual a  $d_{p,m}$  e  $d_p$ .

Os ensaios foram realizados de acordo com a norma ASTM E828-81 (Reapproved 2004, Standard Test Method for Designating the Size of RDF-3 From its Sieve Analysis).

#### 4.1.2 Análise imediata

A análise imediata realizada neste trabalho foi para identificar os teores de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo, sendo este determinado por diferença em base seca. As normas utilizadas estão na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Normas ASTM para realização de análise imediata

Norma ASTM	Análise
E871-82 (2006) - Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood fuels	Umidade
E872-82 (2006) - Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels	Voláteis
E1534-93 (2006) - Standard Test Method for Determination of Ash Content of Particulate Wood fuels	Cinzas

Maiores detalhes do procedimento de análise imediata podem ser encontrados no apêndice A.

#### 4.1.3 Análise elementar

Esta análise forneceu os teores dos elementos constituintes da biomassa como o carbono, hidrogênio, nitrogênio e oxigênio, este último foi calculado por diferença considerando cinza da análise imediata. Particularmente, os elementos analisados na análise elementar foram os que podem liberar ou absorver energia durante as reações que envolvem o processo de gaseificação.

A análise elementar (CHN) foi obtida utilizando o equipamento Perkin Elmer CHN-2400 em base seca, com desvio menor ou igual a 0,2 %, realizada na Central Analítica do Instituto de

#### 4.1.4 Poder calorífico

O poder calorífico de um combustível é o calor liberado pela combustão completa de uma quantidade unitária, a volume constante, em bomba calorimétrica pressurizada internamente com oxigênio. Neste trabalho foi utilizada a norma ASTM E711-87 (Reapproved 2008, Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter) e o equipamento foi o ANALIS 36862 de fabricação belga.

Maiores detalhes do procedimento de cálculo do poder calorífico podem ser encontrados no apêndice B.

## 4.2 Análise de gás produzido

A análise do gás foi realizada através de cromatografia gasosa (CG), que é uma técnica de separação e identificação de misturas voláteis. O cromatógrafo a gás utilizado foi da marca CG tipo 90, com detector de condutividade térmica (DCT) habilitado para utilizar argônio como gás de arraste. Este cromatógrafo possui três colunas: a primeira é a coluna do tipo Peneira Molecular  $5.10^{-10}$  m, de  $3,15.10^{-3}$  m de diâmetro e 2 m de comprimento; a segunda é a coluna Porapak N com  $3,175.10^{-3}$  m de diâmetro e 6 m de comprimento; a terceira é a Chromosorb 101 com  $1,18.10^{-3}$  m de diâmetro por 1 m de comprimento, esta última coluna é utilizada como referência.

O cromatógrafo foi calibrado para um tipo de gás padrão que possui os seguintes teores:  $H_2 = 10,02$  %;  $N_2 = 59,87$  %;  $CH_4 = 9,99$  %;  $CO = 10,04$  %;  $CO_2 = 10,08$  %. A Tabela 4.2 apresenta os parâmetros e valores operacionais do cromatógrafo.

Tabela 4.2: Normas ASTM para realização de análise imediata

Parâmetro	Unidade	Valor
Vazão	$mL.min^{-1}$	30
Pressão	$kPa$	608
Temperatura do detector	$^{\circ}C$	100
Temperatura da coluna	$^{\circ}C$	35
Corrente no filamento	$mA$	70
Gás analisado	N/A	$H_2, N_2, CH_4, CO$ e $CO_2$
Desvio	%	0,5

A análise dos dados foi realizada pelo software PeakSimple, versão 3.93, desenvolvida pela SRI Instruments-USA. A interpretação do cromatograma será realizada através da proporção volumétrica, onde a fração correspondente a um determinado gás é relacionado à área contida sob o pico que o representa no cromatograma. Conhecendo os valores de área e concentração do gás padrão e área da amostra, calcula-se a concentração da amostra em porcentagem por proporcionalidade.

A Figura 4.1 mostra a foto do cromatógrafo utilizado e maiores detalhes podem ser encontrados no Apêndice C.



Figura 4.1: Cromatógrafo CG tipo 90.

Existem algumas relações úteis para a análise do gás produzido, entre elas, a vazão específica de gás referente a vazão de combustível  $[V_{eg}]$  como apresentada pela Equação (4.2).

$$V_{eg} = \frac{\dot{V}_{gás}}{\dot{m}_c} \quad (4.2)$$

em que  $V_{eg}$  é a vazão específica do gás referente a vazão de combustível  $[Nm^3.kg^{-1}]$ ,  $\dot{V}_{gás}$  é a vazão volumétrica do gás  $[Nm^3.s^{-1}]$  e  $\dot{m}_c$  é a vazão mássica  $[kg.s^{-1}]$ . Além disso, pode-se encontrar a vazão específica do componente  $i$ :

$$V_{eg,i} = \frac{\dot{V}_{gás,i}}{\dot{m}_c} \quad (4.3)$$

em que  $\dot{V}_{gás,i}$  é a vazão volumétrica do componente  $i$   $[Nm^3.s^{-1}]$  e pode ser calculada pela Equação (4.4).

$$\dot{V}_{gás,i} = C_i \dot{V}_{gás} \quad (4.4)$$

em que  $C_i$  é o teor do componente  $i$  no gás [%].

Pode-se também calcular a vazão específica do gás reformado  $V_{egr}$  de acordo com a Equação (4.5).

$$V_{egr} = \frac{\dot{V}_{gás} + \dot{V}_p}{\dot{m}_c} \quad (4.5)$$

em que  $\dot{V}_p$  é a vazão volumétrica do plasma  $[Nm^3.s^{-1}]$ .

### 4.3 Caracterização do material inerte

O material inerte utilizado foi areia ( $SiO_2$ ). Esta recebe a especificação comercial AG 40/50 do tipo JL 40 e é procedente de Analândia, SP. É distribuída pela Sand JL Comércio de Minérios LTDA localizada em Descalvado, SP.

#### 4.3.1 Densidade a granel

A densidade a granel de um material é função da relação massa e volume de uma quantidade levemente amontoada. Esta densidade foi realizada pesando-se um volume conhecido do material

em uma balança digital com precisão de 0,1 g. A densidade a granel é dada de acordo com a Equação (4.6) enquanto que a Equação (4.7) apresenta a porosidade do leito fixo.

$$\rho_{gr} = \frac{m_l}{V_l} \quad (4.6)$$

onde  $\rho_{gr}$  é a densidade a granel [ $kg.m^{-3}$ ],  $m_l$  é a massa do leito levemente empacotado [ $kg$ ] e  $V_l$  é o volume do leito levemente empacotado [ $m^3$ ].

$$\varepsilon_f = 1 - \frac{\rho_{gr}}{\rho_a} \quad (4.7)$$

em que  $\rho_a$  é a densidade aparente,  $2525 \pm 16 \text{ kg.m}^{-3}$ , que foi obtida no trabalho de Morita (2009).

### 4.3.2 Fluidodinâmica do leito fluidizado

Os cálculos para a determinação da velocidade de mínima fluidização e velocidade terminal foram calculados de acordo com as metodologias utilizadas nos trabalhos de Kunii e Levenspiel (1991), Santos (2010) e Souza-Santos (2005).

A velocidade de mínima fluidização  $U_{mf}$  é a menor velocidade referente ao fluxo de gás necessária para que ocorra a fluidização das partículas constituintes do leito. É comum obter  $U_{mf}$  por meio de medidas da perda de carga através do leito em função da velocidade do agente fluidizante por meio da equação de Ergun, dada pela Equação (4.8).

$$\frac{\Delta P}{L} = 150 \cdot \frac{(1 - \varepsilon_f)^2 \mu_a U}{\varepsilon_f^3 d_p^2} + 1,75 \frac{1 - \varepsilon_f \rho_g U^2}{\varepsilon_f^3 d_p} \quad (4.8)$$

onde  $\Delta P$  é a perda de carga do leito [ $Pa$ ],  $L$  é a altura do leito fixo [ $m$ ],  $\varepsilon_f$  é a porosidade do leito fixo,  $\mu_a$  é a viscosidade dinâmica do agente fluidizante [ $Pa.s$ ],  $U$  é a velocidade superficial do agente fluidizante [ $m.s^{-1}$ ],  $d_p$  é o diâmetro médio das partículas [ $m$ ] e  $\rho_g$  é a densidade do gás fluidizante [ $kg.m^{-3}$ ].

Utilizando  $U = U_{mf}$  na Equação (4.9), obtemos a Equação (4.9):

$$\frac{\Delta P}{L} = (\rho_p - \rho_g)(1 - \varepsilon_{mf})g \quad (4.9)$$

em que  $\rho_p$  é a densidade aparente da partícula [ $kg.m^{-3}$ ],  $\varepsilon_{mf}$  é a porosidade do material inerte na condição de mínima fluidização.

Combinando a Equação (4.8) e Equação (4.9), obtém-se:

$$U_{mf} = \frac{\mu}{\rho_p d_p} [(1135,7 + 0,0408 Ar)^{1/2} - 33,7] \quad (4.10)$$

onde  $Ar$  é o número de Arquimedes representado por:

$$Ar = \frac{\rho_g d_p^3 (\rho_p - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (4.11)$$

A velocidade terminal  $U = U_t$  pode ser definida como a velocidade máxima do agente fluidizante sem que produza o efeito de elutriação do material inerte. A velocidade terminal depende diretamente do número de Reynolds de acordo com a Equação (4.12):

$$Re = \frac{d_p \rho_g U_t}{\mu} \quad (4.12)$$

em que o número de Reynolds define o valor da velocidade terminal de acordo com a Equação (4.13), Equação (4.14) e Equação (4.15):

$$U_t = \frac{g(\rho_p - \rho_g)^2 d_p^2}{18\mu} \quad \text{para } Re < 0,4 \quad (4.13)$$

$$U_t = d_p \left( \frac{4(\rho_p - \rho_g)^2 g^2}{225\rho_g \mu} \right)^{1/3} \quad \text{para } 0,4 \leq Re \leq 500 \quad (4.14)$$

$$U_t = \left( \frac{3,1(\rho_p - \rho_g) g d_p}{\rho_g} \right)^{1/2} \quad Re > 500 \quad (4.15)$$

#### 4.4 Coleta de alcatrão e particulado

O objetivo da instalação do sistema de coleta de alcatrão e material particulado é quantificar o teor de material particulado e alcatrão presente no gás de gaseificação. O método utilizado foi

adaptado do documento CEN/BT/TF 143 (2005).

O funcionamento do sistema isocinético é dado da seguinte forma: O gás de gaseificação é coletado pelo bocal de uma sonda instalada na tubulação de saída do reator e conduzido por um tubo isolado para a vidraria (impingers). Neste ponto, ocorre a refrigeração dos condensáveis dentro dos impingers com temperatura entre  $-15$  e  $-18$  °C. Todo este sistema é succionado por uma bomba de vácuo que, após a vidraria, é bombeado para um rotâmetro e um gasômetro que registram os dados de vazão e, finalmente, o gás é coletado em bags para análise de gás ou direcionado para o descarte adequado.

A Figura 4.2 ilustra o sistema isocinético completo e a Figura 4.3 apresenta o esquema de um impinger.

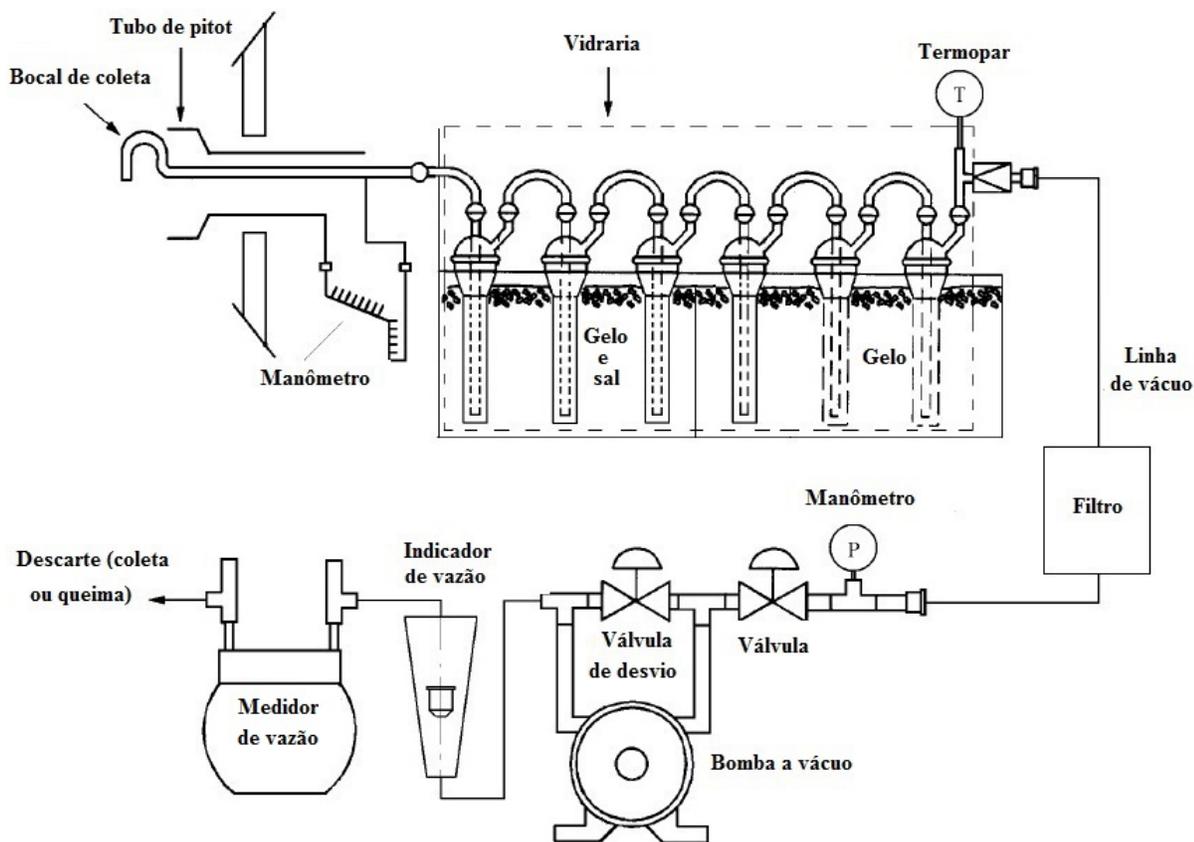


Figura 4.2: Sistema de coleta de alcatrão e particulado.

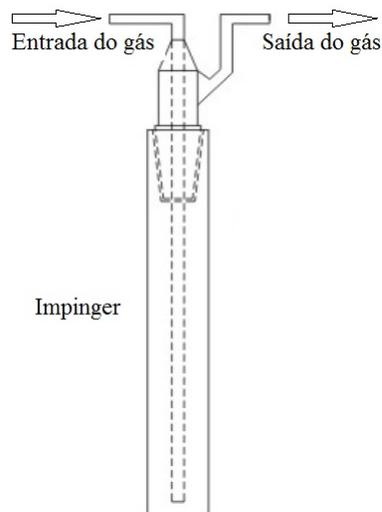


Figura 4.3: Impinger.

É necessário que a bomba de vácuo proporcione ao sistema isocinético uma velocidade idêntica àquela existente na saída do reator de gaseificação, garantindo que sejam coletadas apenas frações do gás produzido, sem alterações no material coletado. Para que tal efeito seja alcançado, um manômetro foi inserido para registrar a pressão local na saída do reator e outro manômetro na linha do sistema isocinético. Considerando temperaturas iguais no tubo da amostra e no bocal da sonda e, regulando a pressão no bocal da sonda igual a pressão no tubo da amostra, a velocidade nos dois escoamentos serão iguais. Para igualar a pressão na sonda com a do tubo de amostra, foi utilizada uma regulação de uma válvula principal de desvio localizada na linha de bomba de vácuo. Maiores detalhes podem ser encontrados no Apêndice D.

#### 4.5 Sistema de gaseificação

Os ensaios de gaseificação foram realizados no laboratório do Departamento de Engenharia Térmica e de Fluidos, na Faculdade de Engenharia Mecânica, localizado na Universidade Estadual de Campinas.

O reator de gaseificação consiste de um tubo cilíndrico de 2 m de comprimento construído em aço inox AISI 310 de 3 mm de espessura revestido externamente por uma camada de 150 mm de manta refratária KAWOOL. O diâmetro interno do reator é de 200 mm.

O sistema de distribuição de ar (agente gaseificante) é constituído pelo compressor, medidor de vazão volumétrica e medição de pressão estática. O ar é fornecido por um compressor tipo Roots marca OMEL SR-07 de 12 *HP*, sua vazão volumétrica é medida por uma placa de orifício de 0,027 *m* de diâmetro interno, previamente calibrada. Utiliza-se o manômetro tipo U de coluna de água para a medição do diferencial de pressão produzido pela placa de orifício previamente calibrada. Este ar ingressa pela parte inferior passando pelo pré-aquecedor, aquecedor e, por fim, encontra a placa distribuidora do reator. A equação da curva de calibração da placa de orifício é dada pela Equação (4.16).

$$\dot{V}_{ar} = 8,26731 \cdot 10^{-4} \sqrt{\Delta h} \quad (4.16)$$

em que  $\dot{V}_{ar}$  é a vazão de ar [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ] e  $\Delta h$  é a diferença manométrica [*mmca*].

A placa distribuidora de ar está localizada na base do tubo e é construída com uma chapa de aço inox de 4 *mm* de espessura composta por 39 bicos de 10 *mm* de diâmetro e 25 *mm* de altura que estão distribuídos em toda a seção da placa. Cada bico possui 4 orifícios de saída de ar de 2 *mm* de diâmetro cada.

O sistema aquecedor localiza-se na parte inferior do corpo do reator e emprega o combustível GLP que está disponível em botijões de 90 *kg* e é controlado por um rotâmetro de marca OMEL na faixa de 0 a 10 *Nl.min*<sup>-2</sup>.

A alimentação do reator é feita por meio de um sistema composto por um silo de capacidade 1 *m*<sup>3</sup> e dois motores equipados com caixa de redução, sendo um acoplado a uma válvula rotativa para quantificar o combustível e o outro a um transportador do tipo rosca-sem-fim de passo constante de 55 *mm* de diâmetro, o qual possui a função de introduzir a biomassa no leito do reator. A velocidade de rotação dos motores é controlada manualmente através de inversores de frequência.

Acima da coluna principal do reator de gaseificação encontra-se o "freeboard". Este "freeboard" é uma expansão que foi construída em aço inox com 760 *mm* de diâmetro externo e 850 *mm* de altura. Este componente apresenta formato cônico, cuja função é reduzir a velocidade dos gases e partículas que estão sendo arrastadas para a saída do reator e, pela gravidade, voltarem à zona de leito. O reator possui um selo de segurança constituído de folha de papel alumínio para o caso de haver um aumento imprevisto na pressão.

Como o gás gerado pela gaseificação não é aplicado a outros sistemas, precisa-se de um des-

carte que não apresente riscos de toxicidade na área de influência. Para isso, este gás é conduzido por meio de uma tubulação de aço carbono com diâmetro interno de 50,80 *mm* que se conecta a um tubo de 101,60 *mm* e, então, é direcionado a um queimador tipo "flare". O queimador consiste em um mecanismo de ignição acionado manualmente que funciona em 220 *V* e utiliza velas de ignição para produzir faíscas para oxidar o gás no "flare", e é construído com chapa de aço inoxidável ANSI 304 possuindo cinco queimadores que utilizam GLP como combustível auxiliar e ar primário. Todo este sistema está aproximadamente a 15 *m* do solo.

Os termopares utilizados no sistema experimental foram do tipo K. Estes, no reator, foram encapsulados em alumina e aço inoxidável para proteção elétrica e mecânica. Foi utilizado o equipamento de registro Fieldlogger da marca NOVUS, para medição das temperaturas, conectado a um computador para coleta dos dados.

A Figura 4.4 apresenta um esquema do sistema de gaseificação de leito fluidizado utilizado.

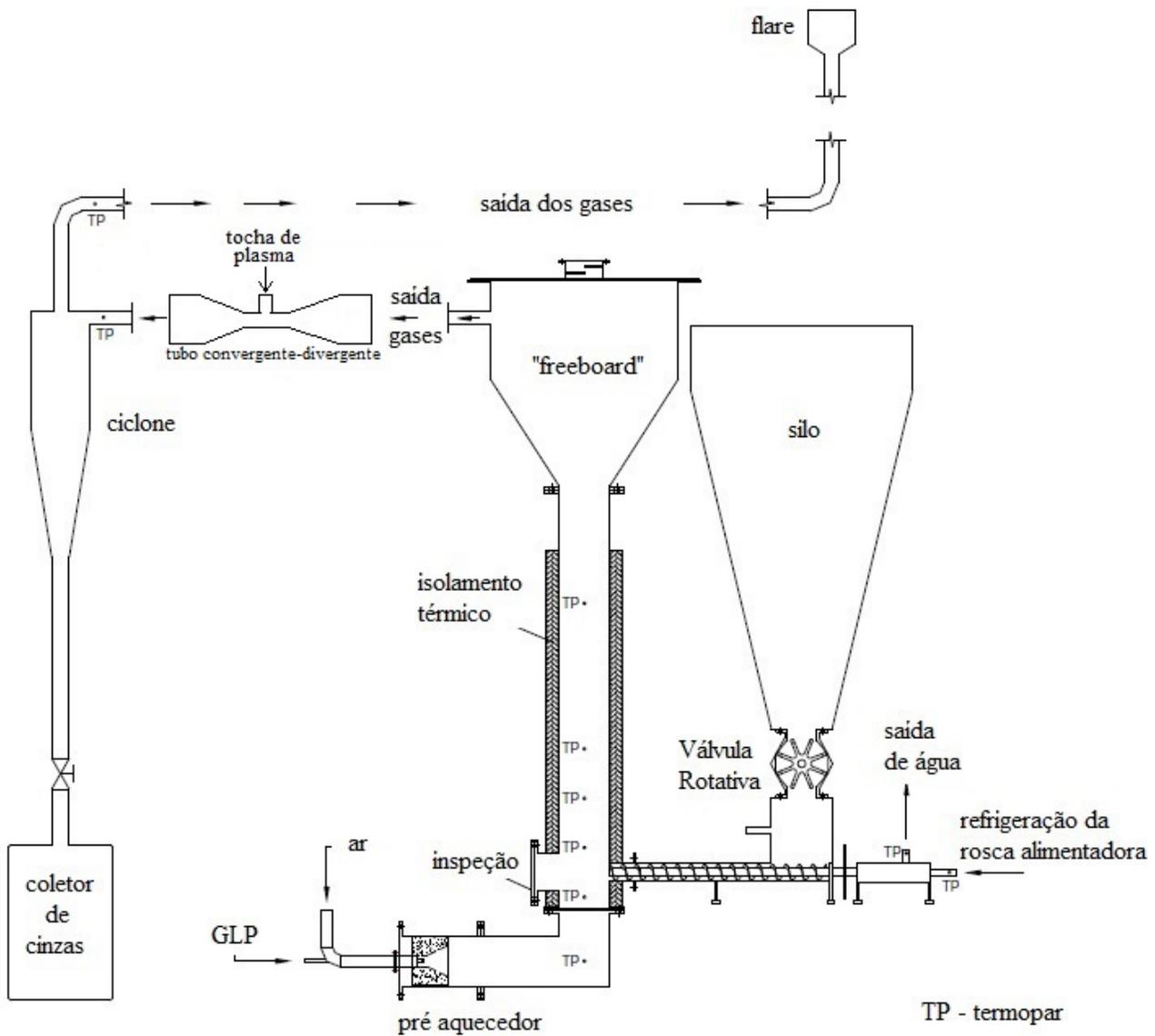


Figura 4.4: Esquema do sistema de gaseificação de leito fluidizado.

#### 4.5.1 Procedimento experimental

O parâmetro de análise para reprodutibilidade do experimento foi o fator de ar. Este é representado pelo volume de ar presente na gaseificação dividido pela quantidade de ar para combustão

estequiométrica do mesmo combustível, representado pela Equação (4.18):

$$FA = \frac{V_{ar}}{VA} \quad (4.17)$$

em que  $V_{ar}$  é o volume de ar empregado na gaseificação em relação ao consumo de combustível [ $Nm^3.kg^{-1}$ ] e  $VA$  é o volume de ar estequiométrico para combustão completa em relação ao consumo de combustível [ $Nm^3.kg^{-1}$ ].

O volume de ar necessário para a combustão completa ( $V_{est}$ ) pode ser calculado de acordo com Yurieniev e Lebediev (1976):

$$VA_{est} = 0,0889(\%C + 0,375\%S) + 0,265\%H - 0,033\%O \quad (4.18)$$

em que  $\%i$  é o teor do elemento  $i$  [%].

O Apêndice E detalha o roteiro operacional do gaseificador em leito fluidizado.

## 4.6 Sistema de tocha a plasma

### 4.6.1 Descrição do sistema

A tocha de plasma utilizada foi da marca Hypertherm modelo T80M e está representada pela Figura 4.5. O peso da tocha é de 2,0 kg.

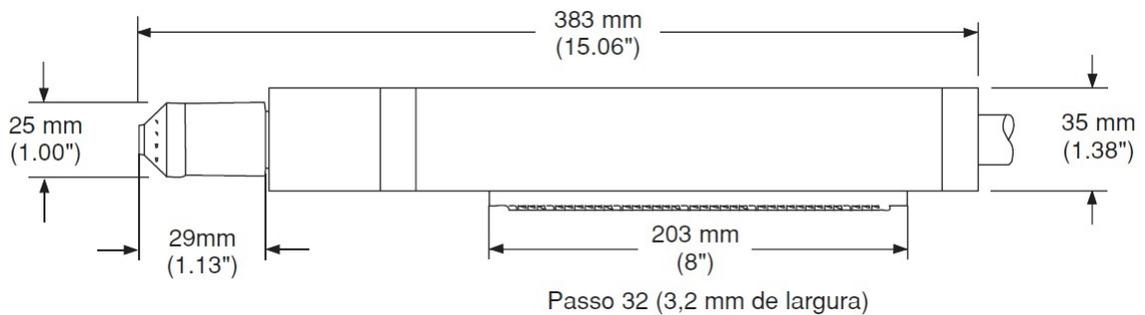


Figura 4.5: Dimensões da tocha de plasma T80M.

O gás de trabalho utilizado foi o nitrogênio comercial da marca White Martins, contido em um cilindro de tipo T de  $9 \text{ m}^3$ . Na tocha de plasma T80M foi utilizado o modo de arco elétrico com corrente contínua, plasma térmico, arco confinado e não-transferido.

A fonte de alimentação utilizada foi a Powermax1250 da empresa Hypertherm. Esta fonte de alimentação é universal e autoconfigurável para operar na faixa 200 a 600  $V$  e trifásica de 230 a 400  $V$ , com corrente de saída de 25 a 80  $A$ . O gás injetado na fonte de alimentação passa por um conjunto de filtros para que a operação com o plasma não seja afetada por contaminantes. É necessário, também, um regulador de alta pressão, para qualquer um dos tipos de suprimento, que seja capaz de fornecer gás para o filtro da fonte de alimentação a uma taxa de  $0,0032 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  a pressão de 4,0  $\text{bar}$ . Se a qualidade do suprimento de gás for insuficiente, a qualidade da operação será reduzida.

A Figura 4.6 apresenta as dimensões da fonte de alimentação e a Figura 4.7 apresenta a parte frontal e posterior da fonte de alimentação da tocha de plasma

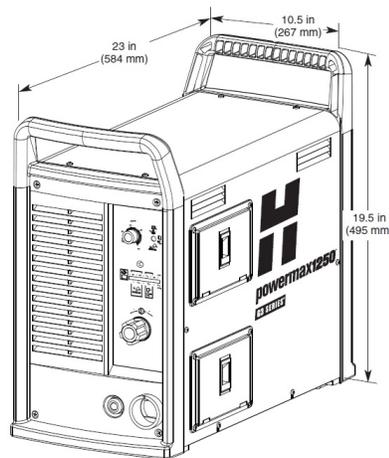


Figura 4.6: Dimensões e visão isométrica da fonte de alimentação Powermax1250.

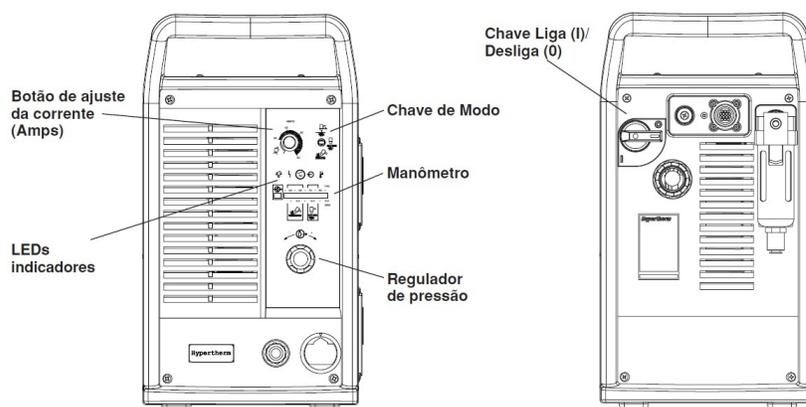


Figura 4.7: Vista frontal e posterior da fonte de alimentação Powermax 1250.

#### 4.6.2 Consumíveis

Os consumíveis utilizados foram da marca Hypertherm, produzidos com plástico e cobre. Estes consumíveis foram selecionados para o modo de operação de goivagem e estão esquematizados na Figura 4.8. Na Tabela 4.3 encontram-se os modelos dos consumíveis.

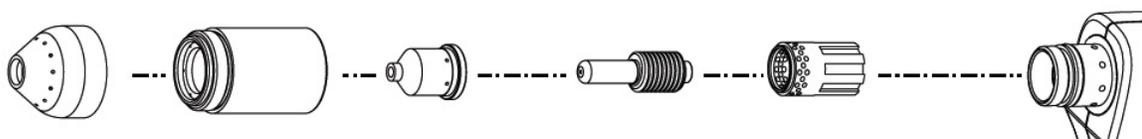


Figura 4.8: Esquema da montagem dos consumíveis para goivagem no bocal da tocha. Da esquerda para a direita: bocal de proteção, bocal de retenção, bico, eletrodo, distribuidor de gás e bocal de acoplamento na tocha.

Tabela 4.3: Consumíveis utilizados

Item	Modelo
Bocal de proteção	HT220798
Bocal de retenção	HT220854
Bico	HT220797
Eletrodo	HT220842
Distribuidor de gás	PMX 65/85 - HT220857

## 4.7 Reforma a plasma

O sistema de reforma a plasma é composto pelo sistema da tocha de plasma e por um tubo convergente-divergente que foi instalado na tubulação de saída do reator de leito fluidizado. As Figura 4.9 e Figura 4.10 apresentam as dimensões do tubo convergente-divergente. A Figura 4.11 apresenta uma foto do tubo onde é possível notar os flanges para a instalação na tubulação de saída do gás de gaseificação, a garganta do tubo e o suporte no qual é inserido a tocha de plasma. A Figura 4.12 mostra o arco elétrico da tocha de plasma dentro da garganta do tubo. A Figura 4.13 mostra o tubo instalado e a tocha de plasma inserida, nesta figura também é possível observar o termopar que registra a temperatura de saída dos gases do tubo.

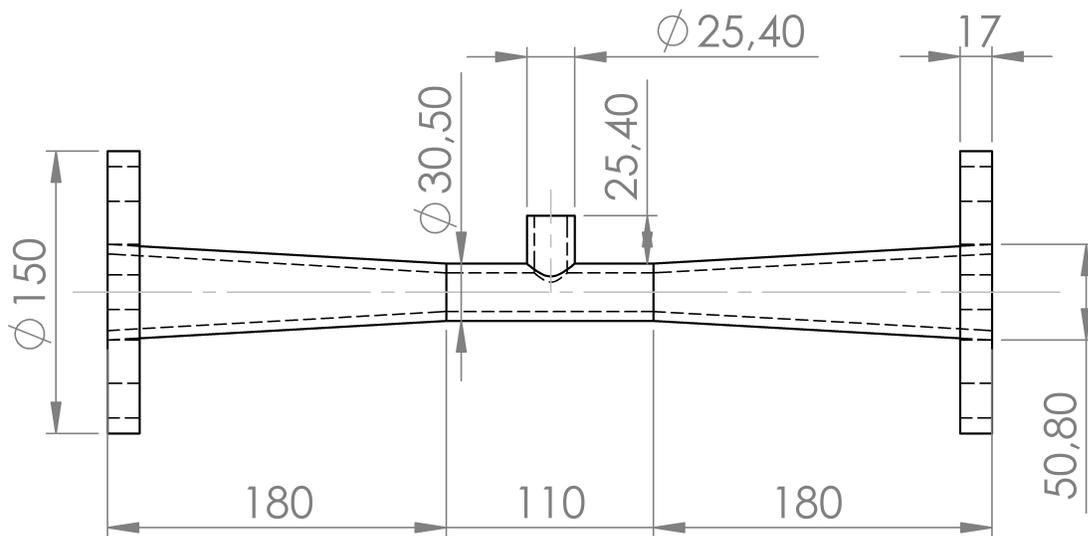


Figura 4.9: Dimensões do tubo convergente-divergente com corte longitudinal

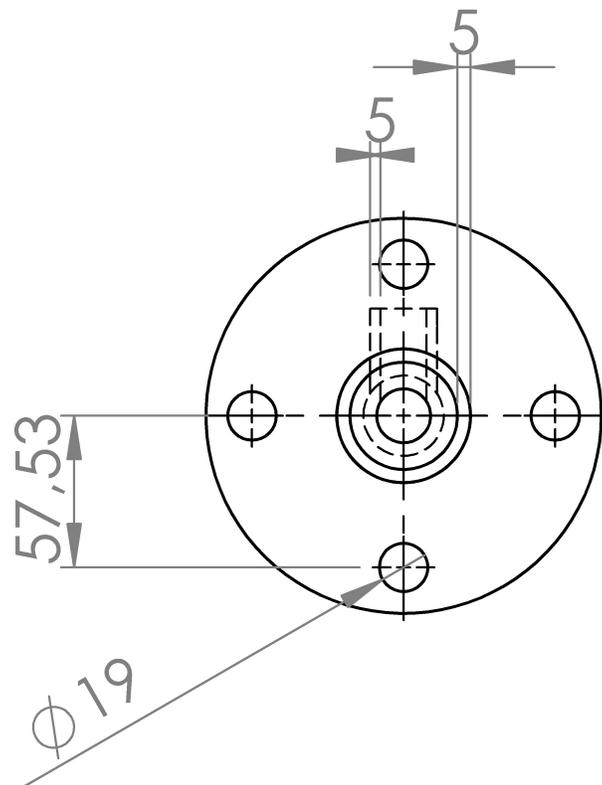


Figura 4.10: Dimensões do tubo convergente-divergente com corte seccional



Figura 4.11: Tubo convergente-divergente.



Figura 4.12: Tocha de plasma em funcionamento dentro do tubo.

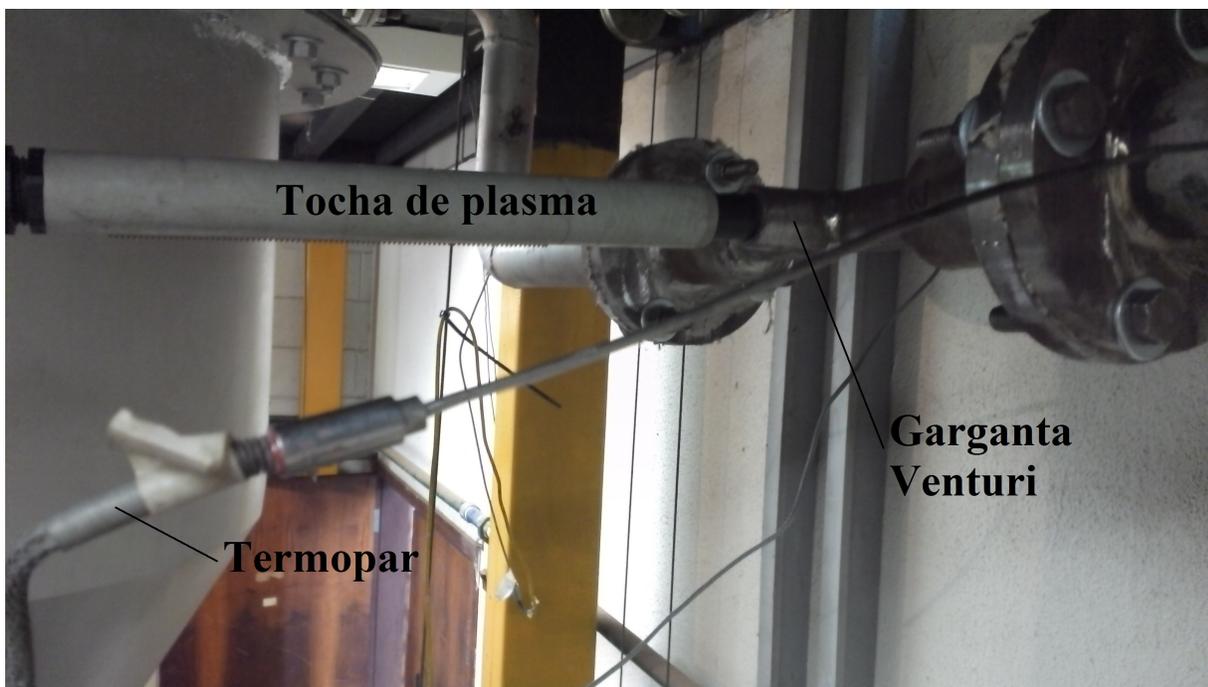


Figura 4.13: Tubo instalado e tocha de plasma inserida na garganta.

Os termopares foram instalados a uma distância de  $22\text{ mm}$  antes e após o bocal da tocha inserido dentro da garganta do tubo. O bocal de proteção foi instalado a uma distância de aproximadamente  $48\text{ mm}$  da parte interna da garganta para evitar corrosão interna do material.

## 4.8 Balanço de nitrogênio

Nesta seção é detalhada o balanço de nitrogênio. O balanço de nitrogênio é importante para se obter a quantidade de nitrogênio que possui a biomassa, o ar de gaseificação, plasma, gás de gaseificação e, por último, alcatrão e material particulado. A Figura 4.14 delimita o volume de controle para a realização do balanço de nitrogênio.



Figura 4.14: Volume de controle para o balanço de nitrogênio.

Matematicamente, o balanço de nitrogênio para a gaseificação convencional é:

$$Ar_{N_2} + B_{N_2} = G_{N_2} + AP_{N_2} \quad (4.19)$$

e para a gaseificação com reforma de gás a plasma é:

$$Ar_{N_2} + B_{N_2} + P_{N_2} = Gr_{N_2} + AP_{N_2} \quad (4.20)$$

em que  $Ar_{N_2}$  é a vazão mássica de nitrogênio no ar [ $kg.s^{-1}$ ],  $B_{N_2}$  é a vazão mássica de nitrogênio na biomassa [ $kg.s^{-1}$ ],  $P_{N_2}$  é a vazão mássica de nitrogênio no plasma [ $kg.s^{-1}$ ],  $G_{N_2}$  é a vazão mássica de nitrogênio na gaseificação convencional,  $Gr_{N_2}$  é a vazão mássica de nitrogênio na gaseificação com reforma de gás a plasma,  $AP_{N_2}$  é a vazão mássica de nitrogênio no alcatrão e material particulado para a gaseificação convencional [ $kg.s^{-1}$ ] e, finalmente,  $APr_{N_2}$  é a vazão mássica de nitrogênio no alcatrão e material particulado para a gaseificação com reforma de gás a plasma [ $kg.s^{-1}$ ].

O cálculo da da vazão mássica de nitrogênio na biomassa foi calculado da seguinte maneira:

$$B_{N_2} = \%N \dot{m}_c \quad (4.21)$$

em que  $\%N$  é o teor de nitrogênio na biomassa [%] e  $\dot{m}_c$  é a vazão mássica de combustível [ $kg.s^{-1}$ ].

A vazão mássica de nitrogênio no plasma,  $P_{N_2} = 0,0134 \text{ kg.s}^{-1}$ , já foi calculada no capítulo de cálculos preliminares, pois é a mesma da vazão mássica da tocha de plasma.

A vazão mássica de nitrogênio no ar foi calculada de acordo com a equação abaixo:

$$Ar_{N_2} = \dot{V}_{ar} \%N_{ar} \rho_{N_2} \quad (4.22)$$

em que  $\dot{V}_{ar}$  é a vazão de ar [ $m^3.s^{-1}$ ],  $\%N_{ar}$  é o teor de nitrogênio no ar [%] e  $\rho_{N_2}$  é a densidade do nitrogênio no ar [ $kg.m^{-3}$ ].

A vazão mássica do gás de gaseificação convencional pode ser calculada conforme:

$$G_{N_2} = \dot{V}_g \%N_g \rho_{N_2} \quad (4.23)$$

sabendo que:

$$\dot{V}_g = \dot{V}_{ar} \frac{\%N_{ar}}{\%N_g} \quad (4.24)$$

em que  $\dot{V}_g$  é a vazão volumétrica do gás de gaseificação [ $Nm^3.s^{-1}$ ] e  $\%N_g$  é o teor de nitrogênio no gás de gaseificação [%].

A vazão mássica de nitrogênio na gaseificação com reforma de gás a plasma é:

$$Gr_{N_2} = P_{N_2} + G_{N_2} \quad (4.25)$$

Agora, pode-se calcular a vazão mássica de nitrogênio no alcatrão e material particulado para a gaseificação convencional:

$$AP_{N_2} = Ar_{N_2} + B_{N_2} - G_{N_2} \quad (4.26)$$

e também a vazão mássica de nitrogênio no alcatrão e material particulado para a gaseificação com reforma de gás a plasma:

$$APr_{N_2} = Ar_{N_2} + B_{N_2} + P_{N_2} - Gr_{N_2} \quad (4.27)$$

Portanto, agora pode-se determinar o fechamento do balanço de nitrogênio para a gaseificação convencional ( $\beta_c$ ):

$$\beta_c = \frac{B_{N_2} + Ar_{N_2}}{G_{N_2} + AP_{N_2}} \quad (4.28)$$

e também o fechamento do balanço de nitrogênio para a reforma do gás de gaseificação a plasma ( $\beta_r$ ):

$$\beta_r = \frac{B_{N_2} + Ar_{N_2} + P_{N_2}}{Gr_{N_2} + AP_{r_{N_2}}} \quad (4.29)$$

## 4.9 Análise de incertezas

Dois conceitos importantes utilizados neste trabalho foram: repetibilidade e reprodutibilidade.

Pode-se definir repetibilidade como a aptidão de um instrumento de medição em fornecer indicações muito próximas, em repetidas aplicações do mesmo mensurando, sob as mesmas condições de medição. Ou seja, condições onde as variações por meio da observação são reduzidas ao mínimo, o procedimento de medição é o mesmo, o observador quando possível é o mesmo, entre outros. A repetibilidade pode ser expressa quantitativamente em termos das características da dispersão das indicações.

Já a reprodutibilidade pode ser definida como o grau de concordância entre os resultados das medições de um mesmo mensurando efetuadas sob condições variadas de medição. As condições alteradas devem ser especificadas para que a reprodutibilidade possa ser válida. Da mesma forma que a repetibilidade, a reprodutibilidade pode ser expressa, quantitativamente, em função das características da dispersão dos resultados.

As três seções abaixo, desvio padrão, propagação de erro e intervalo de confiança, foram adaptadas dos trabalhos de Moore (2005) e Ross (2001).

### 4.9.1 Desvio padrão

O valor mais provável de uma grandeza medida  $n$  vezes é a média aritmética  $\bar{x}$  das medidas realizadas  $x_i$ , ou seja:

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.30)$$

O desvio  $d_i$  de cada medida é definido como:

$$d_i = x_i - \bar{x} \quad (4.31)$$

e o desvio médio  $\bar{d}$  será:

$$\bar{d} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_i = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \bar{x} = \bar{x} - \frac{1}{n}(n\bar{x}) = 0 \quad (4.32)$$

O uso do desvio médio torna-se, portanto, desnecessário. Este não fornece quaisquer informações relevantes. Logo, deve-se definir a variância associada  $\sigma_v^2$  ao conjunto de dados:

$$\sigma_v^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_v)^2}{n} \quad (4.33)$$

em que  $\bar{x}_v$  é o valor médio verdadeiro. Assim, a variância pode ser escrita para um número  $n$  de valores como:

$$\sigma_v^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x}_v)^2 \quad (4.34)$$

Uma vez que o valor médio verdadeiro não for possível de ser conhecido, a melhor estimativa da variância de um conjunto de dados pode ser aproximada para:

$$\sigma^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4.35)$$

em que  $\bar{x}$  é a melhor estimativa do valor verdadeiro, ou seja, o valor médio  $\bar{x}$ .

O desvio padrão  $\sigma$  associado ao conjunto de medidas  $\sigma_x$  é a raiz quadrada da variância, ou seja:

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (4.36)$$

Também, pode-se obter a melhor estimativa da incerteza de um conjunto de  $n$  medidas, que é o desvio padrão da média  $\sigma_m$  dado por:

$$\sigma_m = \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \quad (4.37)$$

O desvio padrão da média indica a tendência de um conjunto de medidas se distribuir em torno da média. Em geral, este valor é utilizado para expressar a incerteza da média.

#### 4.9.2 Propagação de erro

Muito frequentemente determina-se a incerteza não apenas de uma medida, mas a incerteza que um conjunto de medidas acumulará para um resultado final, ou seja, se o valor de uma grandeza física é resultado de uma, ou várias, operações matemáticas com variáveis que possuem incerteza. Deve-se, portanto, conhecer a relação de como essas incertezas afetarão a incerteza do valor da grandeza medida.

Inicialmente, suponha que deseja-se determinar o valor de uma grandeza física  $x$  que é resultado de uma combinação de pelo menos duas variáveis medidas  $u$  e  $v$ . Pode-se determinar o valor de  $x$  por:

$$x = f(u, v, \dots) \quad (4.38)$$

Uma vez que o valor exato de  $x$  não é possível de ser conhecido, assume-se que o valor mais provável de  $x$  é o seu valor médio:

$$\bar{x} = f(\bar{u}, \bar{v}, \dots) \quad (4.39)$$

em que a barra sobre a variável indica o valor médio da variável. A incerteza no valor do resultado  $x$  pode ser determinada considerando a propagação do valor  $x$  resultante da combinação de cada medida individual das variáveis  $u_i, v_i, \dots$  na determinação do valor individual de  $x_i$ , ou seja:

$$x_i = f(u_i, v_i, \dots) \quad (4.40)$$

A distribuição média dessas medidas, para um grande número de medições, deve coincidir com o valor médio forçando pela Equação (4.39), e pode ser utilizado para determinação da variação utilizando a Equação (4.34), logo:

$$\sigma_x^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right) \quad (4.41)$$

O valor de  $(x_i - \bar{x})$  pode ser calculado por série de Taylor de acordo com a Equação (4.42).

$$\begin{aligned} x_i &= \bar{x} + \left(\frac{\partial x}{\partial u}\right) \Delta_u + \left(\frac{\partial^2 x}{\partial u^2}\right) \frac{\Delta_u^2}{2!} + \left(\frac{\partial^3 x}{\partial u^3}\right) \frac{\Delta_u^3}{3!} + \dots \\ &\quad + \left(\frac{\partial x}{\partial v}\right) \Delta_v + \left(\frac{\partial^2 x}{\partial v^2}\right) \frac{\Delta_v^2}{2!} + \left(\frac{\partial^3 x}{\partial v^3}\right) \frac{\Delta_v^3}{3!} + \dots \end{aligned} \quad (4.42)$$

em que  $\Delta_u = (u_i - \bar{u})$  e  $\Delta_v = (v_i - \bar{v})$ .

Desprezando os termos de alta ordem da Equação (4.42), temos:

$$x_i - \bar{x} \approx (u_i - \bar{u}) \left(\frac{\partial x}{\partial u}\right) + (v_i - \bar{v}) \left(\frac{\partial x}{\partial v}\right) + \dots \quad (4.43)$$

Assim, a variância pode ser estimada por:

$$\begin{aligned} \sigma_x^2 &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right) \\ &\approx \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( (u_i - \bar{u}) \left(\frac{\partial x}{\partial u}\right) + (v_i - \bar{v}) \left(\frac{\partial x}{\partial v}\right) + \dots \right)^2 \\ &\approx \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left( (u_i - \bar{u})^2 \left(\frac{\partial x}{\partial u}\right)^2 + (v_i - \bar{v})^2 \left(\frac{\partial x}{\partial v}\right)^2 \right. \\ &\quad \left. + 2(u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v}) \left(\frac{\partial x}{\partial u}\right) \left(\frac{\partial x}{\partial v}\right) + \dots \right) \end{aligned} \quad (4.44)$$

Lembrando que a variância é dada pela Equação (4.41), pode-se escrever de forma análoga:

$$\begin{aligned} \sigma_u^2 &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})^2 \right) \\ \sigma_v^2 &= \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (v_i - \bar{v})^2 \right) \end{aligned} \quad (4.45)$$

em que a covariância  $\sigma_{uv}^2$  entre as variáveis  $u$  e  $v$  é definida de forma análoga:

$$\sigma_{uv}^2 = \lim_{n \rightarrow \infty} \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (u_i - \bar{u})(v_i - \bar{v}) \right) \quad (4.46)$$

Portanto, a Equação (4.44) pode ser escrita como:

$$\sigma_x^2 \approx \sigma_u^2 \left( \frac{\partial x}{\partial u} \right)^2 + \sigma_v^2 \left( \frac{\partial x}{\partial v} \right)^2 + \dots + 2\sigma_{uv} \left( \frac{\partial x}{\partial u} \right) \left( \frac{\partial x}{\partial v} \right) + \dots \quad (4.47)$$

em que os dois primeiros termos da equação correspondem à média quadrática dos desvios ponderados pelo quadrado das respectivas derivadas, e pode ser considerado como sendo o quadrado do desvio da variável  $x$  produzido pelos desvios das variáveis  $u$  e  $v$ . Esses dois termos dominam a incerteza produzida sendo possível, por isso, desprezar o terceiro termo (Bevington e Robinson, 2002). Então a equação geral para avaliação da propagação da certeza é apresentada pela Equação (4.48)

$$\sigma_x^2 \approx \sigma_u^2 \left( \frac{\partial x}{\partial u} \right)^2 + \sigma_v^2 \left( \frac{\partial x}{\partial v} \right)^2 + \dots \quad (4.48)$$

### 4.9.3 Intervalo de confiança

Intervalo de Confiança (IC) é um termo estatístico empregado para designar a representatividade da amostra.

O objetivo do intervalo de confiança é estimar a confiabilidade de todos os dados e pode ser classificado em dois tipos:

- **Bilaterais** – Observação onde a maioria da população está situada. Por exemplo, quando utilizamos 90 % de confiança bilateral, está se referindo que 90 % da população está entre  $a$  e  $b$ , com 5 % menor que  $a$  e 5 % maior que  $b$ .
- **Unilaterais** – Observação da porcentagem maior ou menor (superior e inferior) de um ponto  $a$ . Por exemplo, 95 % de confiança unilateral significa que 95 % da população é maior que  $a$ , sendo  $a$  o limite inferior; ou 95 % da população é menor que  $a$ , sendo  $a$  o limite superior.

Agora será introduzido o método para cálculo do intervalo para média de uma população normal com variância conhecida.

Consideremos uma população descrita por uma variável aleatória normal com média  $\mu$  e variância  $\sigma^2$  :  $X \sim N(\mu; \sigma^2)$ . Vamos supor que o valor de  $\sigma^2$  seja conhecido e que o interesse seja estimar a média  $\mu$  a partir de uma amostra aleatória simples  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . A distribuição amostral de  $\bar{X}$  é normal com média  $\mu$  e variância de acordo com  $\frac{\sigma^2}{n}$ , logo:

$$X \sim N(\mu; \sigma^2) \implies \bar{X} \sim N\left(\mu; \frac{\sigma^2}{n}\right) \quad (4.49)$$

ou seja, diferentes valores de  $\bar{X}$  obtidos a partir das diferentes possíveis amostras se distribuem normalmente em torno de  $\mu$  com variância  $\frac{\sigma^2}{n}$ .

A partir das propriedades de distribuição normal, resulta que:

$$Z = \frac{\bar{X} - \mu}{\sqrt{\frac{\sigma^2}{n}}} \sim N(0; 1) \implies Z = \sqrt{n} \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma} \sim N(0; 1) \quad (4.50)$$

Para estabelecer uma notação rigorosa, indica-se  $z_\alpha$  a abscissa da curva normal padrão que proporciona a probabilidade (área) igual a  $\alpha$  acima dela como apresentada na Figura 4.15. Portanto, fornece a probabilidade  $P(Z > z_\alpha) = \alpha$ . Esta abscissa  $z_\alpha$  é normalmente chamada de valor crítico.

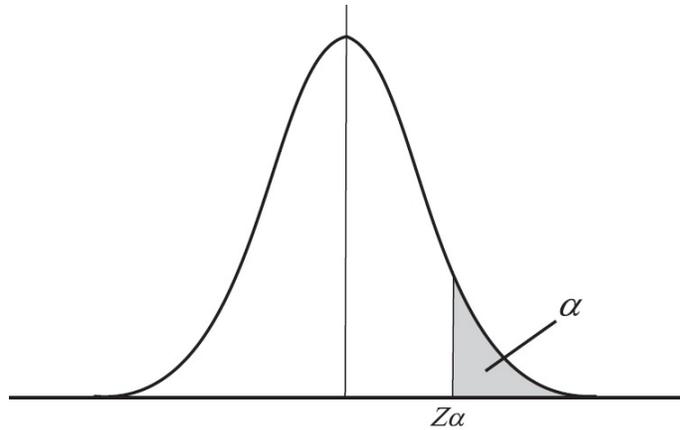


Figura 4.15: Definição do valor crítico  $z_\alpha$ .

Considere agora o valor crítico  $z_{\frac{\alpha}{2}}$ , pode-se ter que, se  $Z \sim N(0; 1)$ :

$$P(-z_{\frac{\alpha}{2}} \leq Z \leq z_{\frac{\alpha}{2}}) = 1 - \alpha \quad (4.51)$$

em que  $\alpha$  é a significância e  $1 - \alpha$  é a confiabilidade dos dados conforme apresentado pela Figura 4.16.

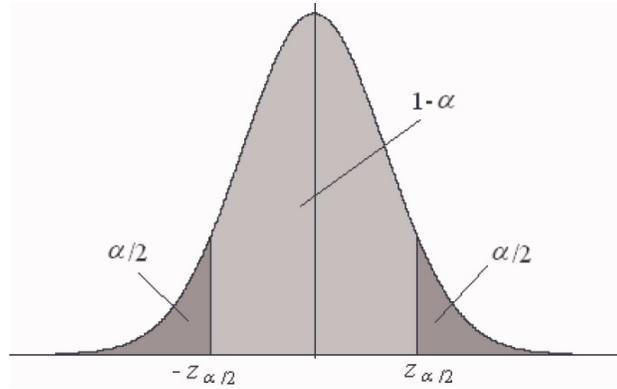


Figura 4.16: Definição do valor crítico  $z_{\frac{\alpha}{2}}$ .

Utilizando a Equação (4.50) e a Equação (4.51):

$$P\left(-z_{\frac{\alpha}{2}} \leq \sqrt{n} \frac{\bar{X} - \mu}{\sigma} \leq z_{\frac{\alpha}{2}}\right) = 1 - \alpha \quad (4.52)$$

mas isso é equivalente a:

$$\begin{aligned} P\left(-z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \bar{X} - \mu \leq z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) &= 1 - \alpha \iff \\ P\left(-\bar{X} - z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq -\mu \leq -\bar{X} + z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) &= 1 - \alpha \iff \\ P\left(\bar{X} - z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \leq \mu \leq \bar{X} + z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right) &= 1 - \alpha \end{aligned} \quad (4.53)$$

Portanto, a Equação (4.53) diz que:

$$P\left(\mu \in \left[\bar{X} - z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \bar{X} + z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}\right]\right) = 1 - \alpha \quad (4.54)$$

Finalmente, pode-se então definir o intervalo de confiança para a média de uma população normal com variância conhecida: Seja  $X \sim N(\mu; \sigma^2)$  uma população, tal que a variância  $\sigma^2$  é conhecida. Se  $X_1, X_2, \dots, X_n$  é uma amostra aleatória simples dessa população, então o intervalo

de confiança de nível de confiança  $1 - \alpha$  para a média populacional  $\mu$  é dado por:

$$\left[ \bar{X} - z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \bar{X} + z_{\frac{\alpha}{2}} \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right] \quad (4.55)$$

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os cálculos, resultados experimentais e a discussão dos dados obtidos como descrito no item materiais e métodos e projeto e cálculos.

### 5.1 Caracterização da biomassa

De acordo com a metodologia utilizada para caracterização da biomassa, o diâmetro médio da partícula mensurado foi igual a  $474 \pm 32 \mu m$ . A curva granulométrica típica da análise realizada para a mistura de Peroba e Garapeira está apresentada na Figura 5.1 e a Figura 5.2 mostra uma foto da biomassa juntamente com uma escala para dimensão da serragem.

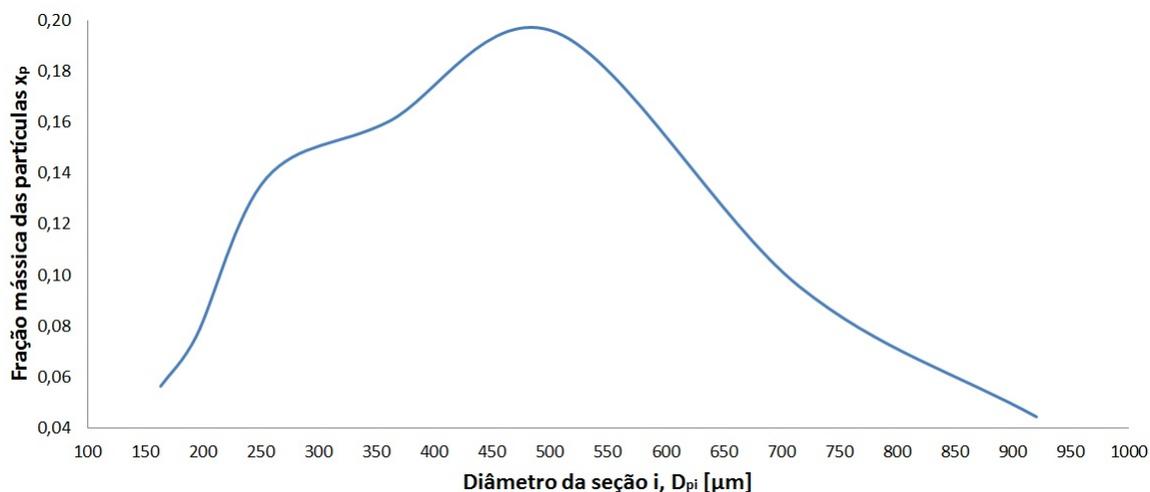


Figura 5.1: Curva granulométrica da biomassa.



Figura 5.2: Foto da mistura de Peroba e Garapeira.

Os resultados da análise imediata estão na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Análise imediata da mistura de Peroba e Garapeira. Nota: *b.u.* representa a amostra em base úmida enquanto que *b.s.* a amostra na base seca

Umidade [ <i>b.u.</i> %]	Carbono fixo [ <i>b.s.</i> %]	Voláteis [ <i>b.s.</i> %]	Cinzas [ <i>b.s.</i> %]
11,85 ± 0,23	9,00 ± 0,58	84,05 ± 0,44	6,95 ± 0,90

O teor alto de voláteis obtido no presente trabalho, 84,05 ± 0,44 %, condiz com valores relatados em outros trabalhos que utilizam a serragem de biomassa como Miller e Tillman (2008) que obtiveram o valor de 84,70 % para a serragem de Pinus, já Jenkins (1990) obteve 82,54 % para o Pinus e 81,42 % para a serragem de Eucalipto. O valor de cinzas obtido neste trabalho foi de 6,95 ± 0,90 % enquanto que pesquisadores encontraram valores menores como Brito e Barrichello (1978) que obtiveram 3,48 % e Jenkins (1990) que obteve valores menores que um por cento. O valor de umidade encontrado em outros trabalhos variam bastante como 45 % para ao Pinus (Miller e Tillman, 2008) e 22 % para o Eucalipto (Jenkins, 1990), enquanto que o obtido neste trabalho foi de 11,85 ± 0,23 %. O último valor obtido pela análise imediata foi de carbono fixo que foi de 9,00 ± 0,58 %, Jenkins (1990) obteve 0,29 % para o Pinus e 0,79 % para o Eucalipto, Miller e Tillman obtiveram 3,48 % para a casca de Eucalipto. A diferença em relação a outros trabalhos é como o teor de Peroba e Garapeira está distribuído na amostra analisada, bem como o teor de umidade na realização da análise (Miller e Tillman, 2008; Jenkins 1990).

O resultado da análise elementar está na Tabela 5.2. Foi observado que a soma do teor de carbono e oxigênio somam mais de 90 % que estão de acordo com os valores mensurados por Miller e Tillman (2008), Jenkins (1990) e Brito e Barrichello (1978).

Tabela 5.2: Análise elementar da mistura de Peroba e Garapeira em que (i) é o valor determinado por diferença considerando cinzas da análise imediata.

Carbono [%]	Hidrogênio [%]	Nitrogênio [%]	Oxigênio (i)
$46,89 \pm 0,2$	$5,99 \pm 0,2$	$0,27 \pm 0,2$	$46,85 \pm 0,2$

O poder calorífico superior obtido pela bomba calorimétrica foi de  $19,06 \pm 0,11 \text{ MJ.kg}^{-1}$  e o poder calorífico inferior foi de  $16,14 \pm 0,13 \text{ MJ.kg}^{-1}$ . O resultado de poder calorífico superior obtido está de acordo com Miller e Tillman (2008) que obtiveram  $19,19 \text{ MJ.kg}^{-1}$  para o Pinus e Jenkins (1990) que obteve  $19,42 \text{ MJ.kg}^{-1}$  para o Eucalipto.

## 5.2 Caracterização do material inerte

A caracterização do material inerte foi importante para os cálculos da fluidodinâmica do leito fluidizado. A Figura 5.3 apresenta a curva granulométrica típica do material inerte enquanto que a Figura 5.4 apresenta o material inerte pronto para ser utilizado para ensaio juntamente com uma escala em milímetros.

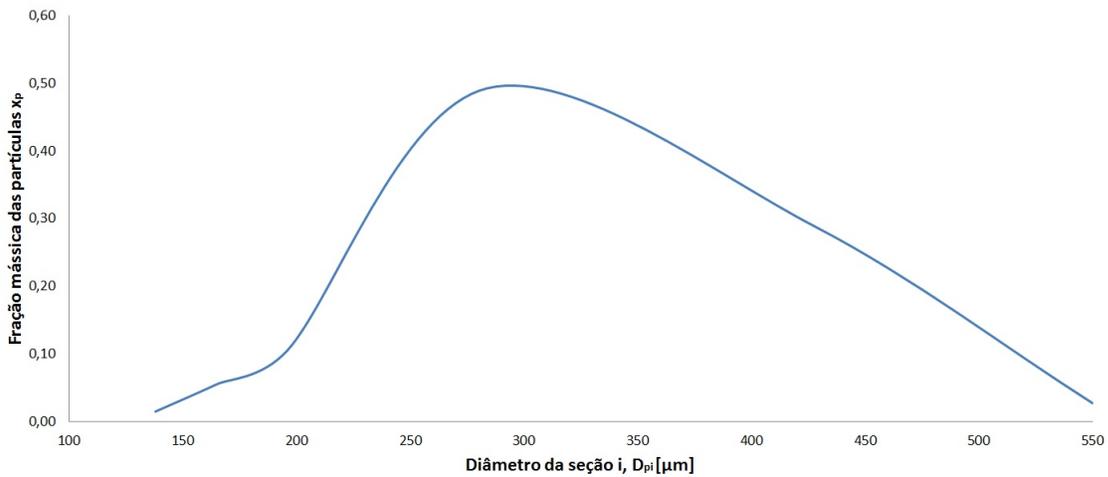


Figura 5.3: Curva granulométrica do material inerte.



Figura 5.4: Material inerte para ensaios.

O diâmetro médio da partícula foi de  $278 \pm 7 \mu m$  e a curva granulométrica foi de acordo com a distribuição normal. A densidade a granel foi de  $1605 \pm 4 kg.m^{-3}$  e, considerando a densidade aparente sendo  $2525 \pm 16 kg.m^{-3}$ , a porosidade do leito foi igual a  $0,36 \pm 0,08$ . Este valor está próximo ao apresentado por Kunii e Levenspiel (1991) que é de 0,42 para areia quartzosa.

### 5.3 Operação do gaseificador de leito fluidizado

A velocidade de mínima fluidização  $U_{mf}$  obtida, considerando somente o material inerte, foi de  $0,06 m.s^{-1}$  e a velocidade terminal foi de  $2,1 m.s^{-1}$  com número de Reynolds na faixa de 0,4 a 500 como apresentado pela metodologia de cálculo da fluidodinâmica do leito fluidizado. Para

todos os ensaios utilizou-se a velocidade de fluidização  $U_f$  de  $0,57 \text{ m.s}^{-1}$ .

O agente fluidizante utilizado foi o ar. Os ensaios foram realizados com  $0,55 \text{ m}$  de leito fixo e para isto foi necessário  $28 \text{ kg}$  de material inerte.

De acordo com a calibração do sistema de alimentação e a vazão na placa de orifício, os ensaios foram realizados com fator de ar  $0,22$ . Para alcançar tal valor, o sistema de alimentação foi configurado para  $222,8 \text{ rpm}$  para o motor de alimentação e  $38,5 \text{ mmca}$  de diferença manométrica na placa de orifício.

O fator de ar foi adotado de acordo com dados presentes na literatura onde oscilam de  $0,2$  a  $0,8$ . Também foi considerado que quanto maior a vazão de ar para fluidização, maior seriam as partículas elutriadas do sistema, por isso foi determinado que a velocidade de fluidização trabalhada fosse mais próxima da velocidade de mínima fluidização calculada do que da velocidade terminal das partículas. Por outro lado, com o aumento da vazão de ar, também há o aumento da vazão mássica de alimentação para que o fator de ar não se altere. Esta vazão mássica foi mensurada para que a rosca sem fim e a válvula de alimentação não travassem durante a operação com grande volume de sólidos alimentados no sistema, o que ocorreu durante a calibração da rosca com certa frequência para vazões mássicas altas.

A Figura 5.5 apresenta a curva de calibração da vazão mássica alimentada no reator.

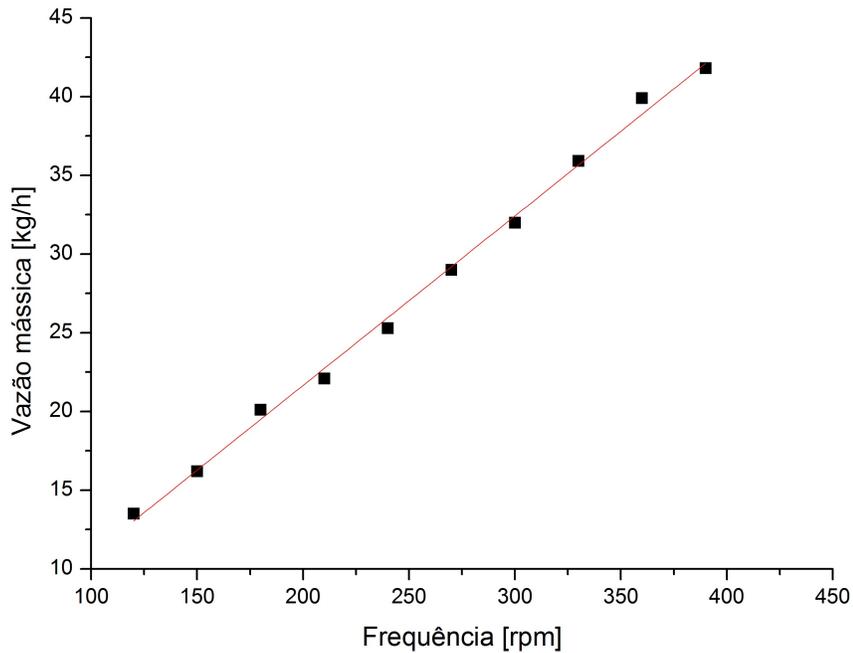


Figura 5.5: Curva de calibração da vazão mássica de biomassa

A partir dos dados de calibração da Figura 5.5, a equação da curva da curva de calibração é:

$$\dot{m}_c = 0,12 + 0,10I \quad (5.1)$$

em que  $\dot{m}_c$  é a vazão mássica [ $kg \cdot h^{-1}$ ],  $I$  é a frequência do motor [ $rpm$ ] e o coeficiente de determinação ajustado  $R^2$  de 0,996.

Como  $I$  é 222,8  $rpm$ , portanto a vazão mássica  $\dot{m}_c$  é 22,4  $kg \cdot h^{-1}$ .

## 5.4 Análise de gás produzido

A Tabela 5.3 apresenta a composição volumétrica dos componentes no gás de gaseificação convencional e a Tabela 5.4 com a reforma a plasma. Em todos os ensaios, a análise do gás no cromatógrafo não foi superior a duas horas após cada ensaio.

Já a Tabela 5.5 e Tabela 5.6 apresentam a composição volumétrica dos componentes no gás de gaseificação convencional e a com a reforma a plasma isentos de nitrogênio, respectivamente.

As análises cromatográficas apresentadas nas tabelas anteriores, Tabela 5.5 e Tabela 5.6, mostraram que o gás sofre alteração nos teores médios de todos os componentes ( $H_2$ ,  $N_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  e  $CO_2$ ), entretanto, quando se considera a análise com desvio padrão e intervalo de confiança, somente o teor do hidrocarboneto leve metano ( $CH_4$ ) se altera quando comparado ao teor deste no gás de gaseificação convencional e no gás de gaseificação com reforma a plasma.

O teor de nitrogênio no gás de gaseificação convencional foi de  $64,86 \pm 1,63$  % enquanto que na reforma a plasma foi de  $64,50 \pm 2,42$  % que, estatisticamente, são iguais. Como o gás de trabalho da tocha de plasma foi o nitrogênio, era de se esperar um aumento no teor deste componente ( $N_2$ ) na análise cromatográfica e queda nos teores dos outros componentes ( $H_2$ ,  $CH_4$ ,  $CO$  e  $CO_2$ ), entretanto, isso não ocorreu. Uma explicação plausível para o mesmo valor do teor deste componente é que a tocha de plasma reformou os componentes presentes no alcatrão e material particulado em gases que pudessem ser analisados pela cromatografia como  $CO$ ,  $H_2$  e  $CH_4$ , aumentando assim seus teores no gás reformado.

O teor de metano ( $CH_4$ ) presente na gaseificação convencional foi de  $5,01 \pm 0,37$  % com intervalo de confiança de [4,60; 5,42], e com a reforma foi de  $3,02 \pm 0,61$  % com intervalo de [2,33; 3,70], promovendo uma redução de 39,72 % em média. Considerando a análise isenta de nitrogênio, foi de  $14,30 \pm 1,67$  % e intervalo de confiança de [12,42; 16,19] para a gaseificação convencional e de  $8,45 \pm 1,36$  % e intervalo de confiança de [6,91; 10,00] para o gás reformado, promovendo uma redução de 40,88 % em média deste componente. Como houve a possibilidade de reforma de alcatrão e material particulado e redução de formação de  $CH_4$ , pode-se inferir que as reações de decomposição térmica do alcatrão e particulado estão de acordo com os dados de Devi, Ptasinski e Janssen (2005), particularmente, nas reações de reforma a vapor, forma seca e formação de carbono como apresentadas na Tabela 2.9.

Tabela 5.3: Composição volumétrica dos componentes no gás de gaseificação convencional.

Componente	Gaseificação convencional						
	Ensaio 1 [%]	Ensaio 2 [%]	Ensaio 3 [%]	Média [%]	Desvio padrão [%]	Confiabilidade [%]	Intervalo de confiança [%]
$H_2$	4,78	3,50	4,22	4,17	0,64	95%	[3,44; 4,89]
$N_2$	63,39	66,62	64,56	64,86	1,63	95%	[63,01; 66,70]
$CH_4$	4,60	5,30	5,13	5,01	0,37	95%	[4,60; 5,42]
$CO$	13,25	12,94	13,12	13,10	0,15	95%	[12,93; 13,28]
$CO_2$	13,99	11,64	12,97	12,86	1,18	95%	[11,53; 14,20]

Tabela 5.4: Composição volumétrica dos componentes no gás de gaseificação com reforma a plasma.

Componente	Gaseificação com reforma a plasma						
	Ensaio 1 [%]	Ensaio 2 [%]	Ensaio 3 [%]	Média [%]	Desvio padrão [%]	Confiabilidade [%]	Intervalo de confiança [%]
$H_2$	3,24	4,33	3,58	3,72	0,56	95%	[3,09; 4,35]
$N_2$	66,89	62,05	64,55	64,50	2,42	95%	[61,76; 67,23]
$CH_4$	2,32	3,28	3,44	3,01	0,61	95%	[2,33; 3,70]
$CO$	14,13	16,38	13,98	14,83	1,35	95%	[13,30; 16,35]
$CO_2$	13,42	13,95	14,45	13,94	0,51	95%	[13,36; 14,52]

Tabela 5.5: Composição volumétrica dos componentes no gás de gaseificação convencional isenta de nitrogênio.

Gaseificação convencional							
Componente	Ensaio 1 [%]	Ensaio 2 [%]	Ensaio 3 [%]	Média [%]	Desvio padrão [%]	Confiabilidade [%]	Intervalo de confiança [%]
$H_2$	13,06	10,49	11,91	11,82	1,29	95%	[10,36; 13,27]
$CH_4$	12,56	15,89	14,46	14,30	1,67	95%	[12,42; 16,19]
$CO$	36,18	38,77	37,03	37,33	1,32	95%	[35,84; 38,82]
$CO_2$	38,20	34,85	36,60	36,55	1,67	95%	[34,66; 38,44]

Tabela 5.6: Composição volumétrica dos componentes no gás de gaseificação com reforma a plasma isenta de nitrogênio.

Gaseificação com reforma a plasma							
Componente	Ensaio 1 [%]	Ensaio 2 [%]	Ensaio 3 [%]	Média [%]	Desvio padrão [%]	Confiabilidade [%]	Intervalo de confiança [%]
$H_2$	9,78	11,42	10,09	10,44	0,87	95%	[9,46; 11,42]
$CH_4$	7,00	8,64	9,70	8,45	1,36	95%	[6,91; 10,00]
$CO$	42,67	43,17	39,37	41,76	2,03	95%	[39,45; 44,06]
$CO_2$	40,54	36,76	40,69	39,35	2,24	95%	[36,81; 41,89]

A razão  $H_2/CO$  para a gaseificação convencional foi de  $0,32 \pm 0,07$  e para a gaseificação com reforma a plasma foi de  $0,25 \pm 0,04$ , ou seja, observa-se que houve uma redução no valor da razão  $H_2/CO$  de 21,87 %. Quando se trabalha com a isenção de nitrogênio, o valor da razão é de  $0,32 \pm 0,04$  para a gaseificação convencional e de  $0,25 \pm 0,02$  para a reforma a plasma, obtendo uma redução de 21,87 %, portanto, a razão  $H_2/CO$  não foi alterada com a reforma a plasma, quando se considera a estatística. Sendo assim, o gás com razões  $H_2/CO$  menores que 0,32 não pode ser aplicado no processo Fischer-tropsch, em um processo de produção de metano, metanol, produção de hidrogênio e turbina a gás como apresentado pela Tabela 2.4.

Na Tabela 5.7 e Tabela 5.8 encontram-se os dados da vazão específica do gás referente a vazão de combustível para a gaseificação convencional e com reforma, respectivamente. Comparando-se estas tabelas, observa-se que alguns valores obtidos para a vazão do componente e para vazão específica do componente quando comparado com a gaseificação convencional e a gaseificação com reforma a plasma foram diferentes. A vazão específica do componente  $N_2$  foi de  $(651,32 \pm 16,36) \cdot 10^{-3} Nm^3.kg^{-1}$  para  $(869,43 \pm 32,62) \cdot 10^{-3} Nm^3.kg^{-1}$ , um aumento de 33,48 %. Para o componente  $CO_2$  houve um aumento de 45,50 %. O valor da vazão específica do componente  $CO$  foi o mais expressivo, de  $(131,55 \pm 1,50) \cdot 10^{-3} Nm^3.kg^{-1}$  para  $(199,90 \pm 18,19) \cdot 10^{-6} Nm^3.kg^{-1}$ , ou seja, um aumento de 51,95 %. Estes valores podem demonstrar que as vazões específicas de  $N_2$ ,  $CO$  e  $CO_2$  aumentaram com a reforma do gás a plasma.

Tabela 5.7: Vazão específica de gás de gaseificação referente a vazão de combustível para a gaseificação convencional.

	Parâmetro	Valor e unidade	Confiabilidade	Intervalo de confiança
Vazão mássica de combustível	$\dot{m}_c$	$6,22 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$		
Vazão de gás de gaseificação	$\dot{V}_{\text{gás}}$	$6,24 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
Vazão específica do gás	$V_{eg}$	$1,00 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$		
Teor de $H_2$	$C_{CO}$	$4,17 \pm 0,64 \%$		
Teor de $N_2$	$C_{N_2}$	$64,86 \pm 1,63 \%$		
Teor de $CH_4$	$C_{CH_4}$	$5,01 \pm 0,37 \%$		
Teor de $CO$	$C_{CO}$	$13,10 \pm 0,15 \%$		
Teor de $CO_2$	$C_{CO_2}$	$12,86 \pm 1,18 \%$		
Vazão do componente $H_2$	$\dot{V}_{\text{gás},H_2}$	$(260,55 \pm 39,98) \cdot 10^{-6} \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
Vazão do componente $N_2$	$\dot{V}_{\text{gás},N_2}$	$(4052,70 \pm 101,84) \cdot 10^{-6} \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
Vazão do componente $CH_4$	$\dot{V}_{\text{gás},CH_4}$	$(313,04 \pm 23,11) \cdot 10^{-6} \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
Vazão do componente $CO$	$\dot{V}_{\text{gás},CO}$	$(818,53 \pm 9,37) \cdot 10^{-6} \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
Vazão do componente $CO_2$	$\dot{V}_{\text{gás},CO_2}$	$(803,54 \pm 73,73) \cdot 10^{-6} \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
Vazão específica do componente $H_2$	$V_{eg,H_2}$	$(41,87 \pm 6,42) \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	95 %	$[34,60 \cdot 10^{-3}; 49,15 \cdot 10^{-3}]$
Vazão específica do componente $N_2$	$V_{eg,N_2}$	$(651,32 \pm 16,36) \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	95 %	$[632,80 \cdot 10^{-3}; 669,85 \cdot 10^{-3}]$
Vazão específica do componente $CH_4$	$V_{eg,CH_4}$	$(50,31 \pm 3,71) \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	95 %	$[46,11 \cdot 10^{-3}; 54,52 \cdot 10^{-3}]$
Vazão específica do componente $CO$	$V_{eg,CO}$	$(131,55 \pm 1,50) \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	95 %	$[129,85 \cdot 10^{-3}; 133,26 \cdot 10^{-3}]$
Vazão específica do componente $CO_2$	$V_{eg,CO_2}$	$(129,11 \pm 11,85) \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	95 %	$[115,73 \cdot 10^{-3}; 142,55 \cdot 10^{-3}]$

Tabela 5.8: Vazão específica de gás de gaseificação reformado referente a vazão de combustível.

	Parâmetro	Valor e unidade	Confiabilidade	Intervalo de confiança
Vazão mássica de combustível	$\dot{m}_c$	$6,22 \cdot 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$		
Vazão de gás reformado	$\dot{V}_{\text{gásr}}$	$8,38 \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
Vazão específica do gás reformado	$V_{egr}$	$1,34 \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$		
Teor de $H_2$	$C_{CO}$	$3,72 \pm 0,56 \%$		
Teor de $N_2$	$C_{N_2}$	$64,50 \pm 2,42 \%$		
Teor de $CH_4$	$C_{CH_4}$	$3,02 \pm 0,61 \%$		
Teor de $CO$	$C_{CO}$	$14,83 \pm 1,35 \%$		
Teor de $CO_2$	$C_{CO_2}$	$13,94 \pm 0,51 \%$		
Vazão do componente $H_2$	$\dot{V}_{\text{gás},H_2}$	$(312,01 \pm 46,97) \cdot 10^{-6} \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
Vazão do componente $N_2$	$\dot{V}_{\text{gás},N_2}$	$(5409,79 \pm 202,97) \cdot 10^{-6} \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
Vazão do componente $CH_4$	$\dot{V}_{\text{gás},CH_4}$	$(253,30 \pm 51,16) \cdot 10^{-6} \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
Vazão do componente $CO$	$\dot{V}_{\text{gás},CO}$	$(1243,83 \pm 113,23) \cdot 10^{-6} \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
Vazão do componente $CO_2$	$\dot{V}_{\text{gás},CO_2}$	$(1169 \pm 42,78) \cdot 10^{-6} \text{ Nm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$		
Vazão específica do componente $H_2$	$V_{eg,H_2}$	$(50,14 \pm 7,54) \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	95 %	$[41,60 \cdot 10^{-3}; 58,68 \cdot 10^{-3}]$
Vazão específica do componente $N_2$	$V_{eg,N_2}$	$(869,43 \pm 32,62) \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	95 %	$[832,51 \cdot 10^{-3}; 906,34 \cdot 10^{-3}]$
Vazão específica do componente $CH_4$	$V_{eg,CH_4}$	$(40,70 \pm 8,22) \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	95 %	$[31,40 \cdot 10^{-3}; 50,01 \cdot 10^{-3}]$
Vazão específica do componente $CO$	$V_{eg,CO}$	$(199,90 \pm 18,19) \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	95 %	$[179,30 \cdot 10^{-3}; 220,49 \cdot 10^{-3}]$
Vazão específica do componente $CO_2$	$V_{eg,CO_2}$	$(187,90 \pm 6,87) \cdot 10^{-3} \text{ Nm}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$	95 %	$[180,12 \cdot 10^{-3}; 195,68 \cdot 10^{-3}]$

## 5.5 Análise de temperatura

A Figura 5.6 apresenta a curva de elevação de temperatura do aquecimento, o ensaio de gaseificação e o término (resfriamento) de um dos ensaios de gaseificação convencional. Já a Figura 5.7 apresenta a curva de elevação de temperatura do aquecimento, o ensaio de gaseificação com reforma a plasma e o término do ensaio (resfriamento). Estas curvas de temperaturas apresentadas são semelhantes às curvas encontradas pelos trabalhos de Pellegrino (2006) e Behainne (1999), pois eles utilizaram o mesmo reator e condições semelhantes de operação.

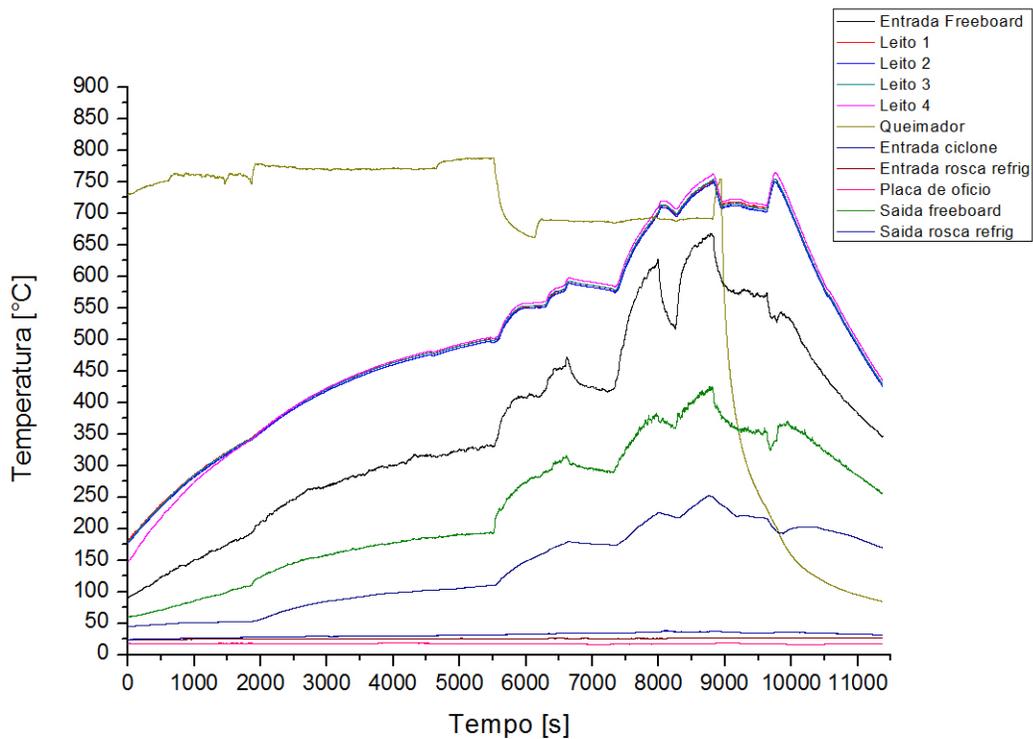


Figura 5.6: Curva de elevação de temperatura, ensaio e resfriamento da gaseificação convencional.

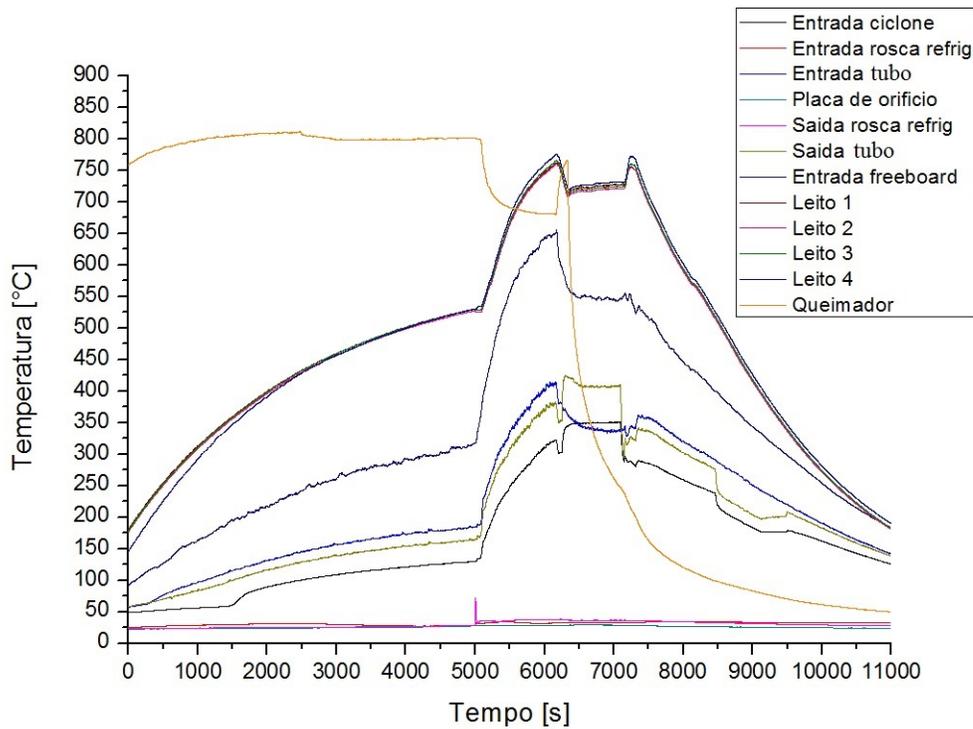


Figura 5.7: Curva de elevação de temperatura, ensaio e resfriamento da gaseificação com reforma a plasma.

Na curva de gaseificação convencional é possível notar que a gaseificação ocorreu aproximadamente entre a faixa de tempo 9000 e 10000 s, onde observa-se a elevação da temperatura do leito. Na Figura F.12, a gaseificação juntamente com a reforma a plasma ocorreu no intervalo em que a temperatura da saída do tubo convergente-divergente está em patamar mais elevado em relação a temperatura de entrada do tubo, por volta de 6000 e 7000 s.

É possível notar em ambas figuras que as curvas de aumento de temperaturas nos leitos é uma função exponencial. Verificou-se durante os ensaios que o aquecimento, somente com a queima de ar e GLP, não era suficiente para alcançar a temperatura de gaseificação desejada (por volta de 750 °C). Para isto, foi necessário, após um certo tempo de aquecimento, a combustão entre ar e biomassa para alcançar a temperatura de gaseificação. Nota-se, por tal motivo, a oscilação da temperatura do leito antes do processo de gaseificação. O processo de gaseificação ocorreu em  $740 \pm 25$  °C. Esta temperatura de operação favorece a formação de alcatrão no gás de gaseificação como especificado Baker et al. (1988), possibilitando assim uma análise quantitativa de alcatrão e

material particulado.

Devido à granulometria e umidade da biomassa utilizada, foi possível alimentar o reator uniformemente, resultando em um controle melhor da temperatura do leito. Caso este fato não ocorresse, provavelmente geraria grandes oscilações na temperatura que comprometeria assim a reprodutibilidade dos ensaios.

Pode-se observar pela Figura 5.7 que a temperatura de entrada e saída no tubo convergente-divergente foram aproximadamente iguais até por volta de 500 s. Após este tempo, a temperatura de entrada no tubo foi levemente superior à temperatura de saída do tubo. Esta diferença permanece até o momento da gaseificação com reforma a plasma, por volta de 6000 s. Nota-se que, a partir do funcionamento da tocha, a temperatura de saída se torna mais alta que a temperatura de entrada no tubo. Durante o funcionamento da tocha de plasma e reforma do gás de gaseificação a temperatura de entrada no tubo foi de  $325 \pm 20$  °C e a temperatura de saída foi de  $410 \pm 10$  °C, uma diferença de 85 °C.

É interessante observar que o comportamento da curva de temperatura de saída do tubo tem o mesmo comportamento da curva de temperatura de entrada do ciclone. De fato, a distância entre a saída do tubo e entrada do ciclone é de 0,5 m e, pode-se afirmar, que houve somente perda de calor para o ambiente através da tubulação, ocorrendo assim a queda de temperatura.

Maiores detalhes podem ser encontrados no Apêndice F.

## 5.6 Análise de alcatrão e particulado

Durante os ensaios de gaseificação convencional e com a reforma a plasma, procurou-se que todos os ensaios fossem realizados de maneira estável em relação à pressão e temperatura de operação no leito, alimentação da biomassa e vazão de ar. A Tabela 5.9 apresenta a vazão mássica de alcatrão coletado quando realizadas a gaseificação convencional e a Tabela 5.10 com reforma a plasma. Em todos os ensaios, a análise gravimétrica do alcatrão não foi superior a uma hora após o término de cada ensaio.

Tabela 5.9: Vazão mássica de alcatrão e material particulado coletados nos ensaio de gaseificação convencional.

Gaseificação convencional		
	Valor	Unidade
Ensaio 1	$5,53.10^{-3}$	$g.s^{-1}$
Ensaio 2	$5,66.10^{-3}$	$g.s^{-1}$
Ensaio 3	$4,58.10^{-3}$	$g.s^{-1}$
Média	$5,26.10^{-3}$	$g.s^{-1}$
Desvio padrão	$0,58.10^{-3}$	$g.s^{-1}$
Confiabilidade	95	%
Intervalo de confiança	$[4,59.10^{-3}; 5,92.10^{-3}]$	$g.s^{-1}$

Tabela 5.10: Vazão mássica de alcatrão e material particulado coletados nos ensaio de gaseificação com reforma a plasma.

Gaseificação com reforma a plasma		
	Valor	Unidade
Ensaio 1	$4,15.10^{-3}$	$g.s^{-1}$
Ensaio 2	$3,95.10^{-3}$	$g.s^{-1}$
Ensaio 3	$3,85.10^{-3}$	$g.s^{-1}$
Média	$3,98.10^{-3}$	$g.s^{-1}$
Desvio padrão	$0,15.10^{-3}$	$g.s^{-1}$
Confiabilidade	95	%
Intervalo de confiança	$[3,81.10^{-3}; 4,16.10^{-3}]$	$g.s^{-1}$

A Figura 5.8 mostra o gás dentro dos impingers para coleta de alcatrão e particulado, a Figura 5.9 apresenta a contaminação na mangueira na saída da sonda isocinética para os impingers resfriados, a Figura 5.10 mostra o filtro utilizado para um ensaio, a Figura 5.11 apresenta o alcatrão coletado diluído em álcool isopropílico, a Figura 5.12 apresenta os consumíveis novos antes de um ensaio com reforma a plasma e a Figura 5.13 apresenta os consumíveis após o mesmo ensaio.



Figura 5.8: Gás de gaseificação dentro dos impingers.



Figura 5.9: Mangueira de conexão da sonda à vidraria utilizada.



Figura 5.10: Filtro após a vidraria utilizado.



Figura 5.11: Alcatrão coletado diluído em álcool isopropílico.



Figura 5.12: Consumíveis novos.



Figura 5.13: Consumíveis utilizados.

O gás de gaseificação dentro dos impingers na Figura 5.8 pode ser, de certo modo, indicador de reações dentro do reator de gaseificação pois, em algumas vezes, as reações de gaseificação não ocorriam porque a rosca de alimentação não alimentava continuamente ou travava e rapidamente os impingers ficavam transparentes, indicando que não havia reações ocorrendo dentro do reator e resultava, portanto, no descarte do ensaio.

Já na Figura 5.13 é possível observar o acúmulo de alcatrão e material particulado nos consumíveis. O bocal da tocha (lado direito da figura) está com maior acúmulo de material particulado e alcatrão do lado esquerdo do que do lado direito, isso se deve ao fato do lado com maior acúmulo destes contaminantes estar voltado para o fluxo de gás de gaseificação, onde há impacto no ponto de estagnação, e conseqüentemente, há uma menor retenção de alcatrão e material particulado, do lado direito do bocal, devido a possíveis vórtices sobre este ponto.

A concentração de alcatrão e material particulado pode ser visto na Tabela 5.11 para o gás de gaseificação convencional e na Tabela 5.12 com a reforma a plasma. Os valores de concentração obtidos estão de acordo com o apresentado por Hasler e Nussbaumer (1999). Esta condição pode ser justificada pelo teor de voláteis, conversão de carbono e característica de operação do reator como, por exemplo, a temperatura de operação como apresentado por Baker et al. (1988) para a formação de alcatrão. Experimentalmente, nota-se que quando realizou-se a reforma do gás a plasma a vazão mássica de alcatrão e particulado foi de  $(3,98 \pm 0,15)10^{-3} \text{ g.s}^{-1}$  e intervalo de confiança de  $[3,81.10^{-3}; 4,16.10^{-3}]$ , com concentração de  $66,50 \pm 2,35 \text{ g.Nm}^{-3}$  e intervalo de confiança de  $[63,84; 69,16]$ . Já o teor de alcatrão e particulado encontrados na gaseificação convencional foi de  $(5,26 \pm 0,58)10^{-3} \text{ g.s}^{-1}$  e intervalo de confiança de  $[4,59.10^{-3}; 5,92.10^{-3}]$ , com concentração de  $81,87 \pm 7,00 \text{ g.Nm}^{-3}$  e intervalo de confiança de  $[73,94; 84,79]$ . Portanto, uma redução de 24,52 % na média de vazão mássica de alcatrão e material particulado.

Tabela 5.11: Concentração de alcatrão e material particulado coletados nos ensaio de gaseificação convencional.

Gaseificação convencional		
	Valor	Unidade
Ensaio 1	81,50	$g.Nm^{-3}$
Ensaio 2	75,06	$g.Nm^{-3}$
Ensaio 3	89,05	$g.Nm^{-3}$
Média	81,87	$g.Nm^{-3}$
Desvio padrão	7,00	$g.Nm^{-3}$
Confiabilidade	95	%
Intervalo de confiança	[73,94; 89,79]	$g.Nm^{-3}$

Tabela 5.12: Concentração de alcatrão e material particulado coletados nos ensaio de gaseificação com reforma a plasma.

Gaseificação com reforma a plasma		
	Valor	Unidade
Ensaio 1	65,87	$g.Nm^{-3}$
Ensaio 2	64,53	$g.Nm^{-3}$
Ensaio 3	69,11	$g.Nm^{-3}$
Média	66,50	$g.Nm^{-3}$
Desvio padrão	2,35	$g.Nm^{-3}$
Confiabilidade	95	%
Intervalo de confiança	[63,84; 69,16]	$g.Nm^{-3}$

O gás proveniente da gaseificação de biomassa utilizando reforma a plasma, mesmo com redução de teor de alcatrão e particulado para  $(3,97 \pm 0,14)10^{-3} g.s^{-1}$ , não pode ser utilizado para a alimentação de motor de combustão interna (Hasler e Nussbaumer, 1999), turbina a gás (Tao, 2010) e células a combustível (Kaltschmitt e Hartmann, 2001), pois os teores obtidos neste trabalho estão acima dos permitidos para as aplicações citadas.

A grande maioria dos trabalhos de reforma, eliminação ou redução de alcatrão e material particulado presentes na literatura utilizam outro tipo de plasma para este fim, neste caso, o plasma de micro-ondas. Sendo assim, portanto, a comparação dos dados obtidos neste trabalho com os

da literatura está de acordo com Nair et al. (2003) que obtiveram de 8 a 43 % de eficiência de conversão de hidrocarbonetos pesados em leves utilizando nitrogênio como gás de trabalho.

## 5.7 Balanço de nitrogênio

Com as equações apresentadas no capítulo materiais e métodos e os dados experimentais obtidos neste capítulo, pode-se realizar o balanço de nitrogênio para a gaseificação convencional e para a gaseificação com reforma de gás a plasma. A Tabela 5.13 e a Tabela 5.14 apresentam os dados para a gaseificação convencional e com reforma de gás a plasma, respectivamente.

Tabela 5.13: Balanço de nitrogênio para a gaseificação convencional

Balanço de nitrogênio convencional			
	Parâmetro	Valor	Unidade
Teor de nitrogênio na biomassa	$\%N$	0,27	%
Vazão mássica de combustível	$\dot{m}_c$	$6,22 \cdot 10^{-3}$	$kg \cdot s^{-1}$
Vazão mássica de nitrogênio na biomassa	$B_{N_2}$	$16,8 \cdot 10^{-6}$	$kg \cdot s^{-1}$
Vazão de ar	$\dot{V}_{ar}$	$5,13 \cdot 10^{-3}$	$Nm^3 \cdot s^{-1}$
Teor de nitrogênio no ar	$\%N_{ar}$	79	%
Densidade do nitrogênio no ar	$\rho_{N_2}$	1,16	$kg \cdot m^{-3}$
Vazão mássica de nitrogênio no ar	$Ar_{N_2}$	$4,72 \cdot 10^{-3}$	$kg \cdot s^{-1}$
Vazão do gás de gaseificação convencional	$\dot{V}_g$	$6,24 \cdot 10^{-3}$	$Nm^3 \cdot s^{-1}$
Teor de nitrogênio no gás de gaseificação	$\%N_g$	64,86	%
Vazão mássica de nitrogênio na gaseificação convencional	$G_{N_2}$	$4,72 \cdot 10^{-3}$	$kg \cdot s^{-1}$
Vazão mássica de nitrogênio no alcatrão e material particulado para a gaseificação convencional	$AP_{N_2}$	$1,68 \cdot 10^{-5}$	$kg \cdot s^{-1}$
Fechamento do balanço para gaseificação convencional	$\beta_c$	1,0	

Tabela 5.14: Balanço de nitrogênio para a gaseificação com reforma de gás de gaseificação a plasma

Balanço de nitrogênio com reforma de gás a plasma			
	Parâmetro	Valor	Unidade
Teor de nitrogênio na biomassa	$\%N$	0,27	%
Vazão mássica de combustível	$\dot{m}_c$	$6,22 \cdot 10^{-3}$	$kg.s^{-1}$
Vazão mássica de nitrogênio na biomassa	$B_{N_2}$	$16,8 \cdot 10^{-6}$	$kg.s^{-1}$
Vazão mássica de nitrogênio no plasma	$P_{N_2}$	$13,4 \cdot 10^{-3}$	$kg.s^{-1}$
Vazão de ar	$\dot{V}_{ar}$	$5,13 \cdot 10^{-3}$	$Nm^3.s^{-1}$
Teor de nitrogênio no ar	$\%N_{ar}$	79	%
Densidade do nitrogênio no ar	$\rho_{N_2}$	1,16	$kg.m^{-3}$
Vazão mássica de nitrogênio no ar	$Ar_{N_2}$	$4,72 \cdot 10^{-3}$	$kg.s^{-1}$
Vazão mássica de nitrogênio na gaseificação com reforma de gás a plasma	$G_{N_2}$	$18,1 \cdot 10^{-3}$	$kg.s^{-1}$
Vazão mássica de nitrogênio no alcatrão e material particulado para a gaseificação com reforma de gás a plasma	$APr_{N_2}$	$1,68 \cdot 10^{-5}$	$kg.s^{-1}$
Fechamento do balanço para a reforma do gás de gaseificação a plasma	$\beta_r$	1,0	

Em ambas as tabelas anteriores, Tabela 5.13 e Tabela 5.14, nota-se que a vazão mássica de nitrogênio no alcatrão e material particulado para o caso convectivo e para o caso com reforma de gás a plasma foram dependentes da vazão mássica de nitrogênio na biomassa, vazão mássica de nitrogênio no ar, vazão mássica de nitrogênio na gaseificação convencional e, além disso, para o balanço de nitrogênio com reforma de gás a plasma foi considerada a vazão mássica de nitrogênio no plasma, conforme detalhadas pela Equação (4.19) e Equação (4.20).

Ainda em relação às tabelas anteriores, a vazão mássica de nitrogênio na gaseificação convencional foi de  $4,72 \cdot 10^{-3} kg.s^{-1}$  e a vazão mássica de nitrogênio no gás de gaseificação com reforma de gás a plasma foi de  $18,1 \cdot 10^{-3} kg.s^{-1}$ , um aumento de 383 %. Este aumento se deve principalmente a vazão mássica de nitrogênio no plasma que foi de  $13,4 \cdot 10^{-3} kg.s^{-1}$ , já que a vazão mássica de nitrogênio na biomassa é pequena,  $16,8 \cdot 10^{-6} kg.s^{-1}$ .

Aa vazão mássica de nitrogênio no alcatrão e material particulado foi igual o valor da vazão mássica de nitrogênio no alcatrão e material particulado para a gaseificação com reforma de gás a plasma,  $1,68 \cdot 10^{-5} kg.s^{-1}$ . Esta caso evidencia que o nitrogênio proveniente da tocha de plasma não altera o nitrogênio presente no alcatrão e material particulado, ou seja, todo o nitrogênio que a

tocha insere no gás de gaseificação para reforma não produz aumento em massa de sólido (material particulado) ou líquido (alcatrão).

## 6 CONCLUSÃO

Baseando-se nos cálculos preliminares e análises apresentados no capítulo de materiais e métodos e nas análises dos resultados e discussão apresentados no capítulo anterior, que foram obtidos a partir dos ensaios de gaseificação de serragem de Peroba e Garapeira convencional e gaseificação com a reforma de gás utilizando tocha de plasma, pode-se obter as seguintes conclusões.

Em relação à análise convectiva da tocha de plasma, a temperatura da tocha de plasma foi considerada alta, maior que  $680\text{ K}$ , para valores menores que  $48\text{ mm}$  de distância. A temperatura ainda pode alcançar aproximadamente  $1400\text{ K}$  a uma distância de  $30\text{ mm}$  do bocal da tocha e, além disso, pode ultrapassar esta faixa de temperatura quando se aproxima ainda mais do bocal da tocha.

No capítulo Cálculos Preliminares, a entalpia do plasma foi de  $5041\text{ kJ.kg}^{-1}$  de acordo com a norma ASTM E341-08 (Standard Practice for Measuring Plasma Arc Gas Enthalpy by Energy Balance). Este cálculo de entalpia foi necessário para o estudo de balanço de energia que considera o volume de controle sobre o tubo convergente-divergente. O cálculo da temperatura, para a reforma de gás de gaseificação perto do bocal da tocha de plasma, foi maior que  $2946\text{ K}$ . Esta temperatura é suficiente para a destruição do alcatrão.

As análises mostraram que o gás ao ser reformado pela tocha de plasma sofre alteração no teor de metano e na vazão mássica de alcatrão e particulado. Além disso, as vazões específicas dos componentes  $N_2$ ,  $CO$  e  $CO_2$  foram alteradas quando comparadas a gaseificação convencional com a gaseificação com reforma de gás a plasma.

O teor do metano foi reduzido em  $39,72\%$  quando utilizado a reforma a plasma. Esta redução está de acordo com as reações de craqueamento de alcatrão conforme descritas pela literatura. O teor de nitrogênio permaneceu o mesmo e, como o gás de trabalho da tocha de plasma foi o nitrogênio e os teores dos componentes da análise cromatográfica permaneceram os mesmos, pode-se inferir que a tocha de plasma reformou os componentes do alcatrão e material particulado, caso contrário, não haveria o mesmo teor volumétrico dos componentes  $H_2$ ,  $CO$  e  $CO_2$  na análise cromatográfica.

O valor obtido para a razão  $H_2/CO$  para a gaseificação convencional foi  $0,32 \pm 0,05$  e para a

gaseificação com reforma a plasma foi  $0,25 \pm 0,04$ . Estes teores são baixos e, portanto, este gás não pode ser aplicado diretamente em processos como Fischer-tropsch, metano, metanol e produção de hidrogênio.

A temperatura de entrada no tubo convergente-divergente durante a reforma de gás de gaseificação foi de  $325 \pm 20^\circ C$  enquanto que a temperatura de saída dos gases no tubo convergente-divergente foi de  $410 \pm 10^\circ C$ .

O objetivo deste trabalho foi verificar a redução do teor de alcatrão e particulado utilizando a tocha de plasma instalada na garganta de um tubo convergente-divergente. Observou-se que a coleta de alcatrão e material particulado foi de 24,52 % menor quando comparado com a gaseificação convencional em relação a gaseificação com reforma de gás utilizando a tecnologia da tocha de plasma, cumprindo assim com o objetivo estabelecido.

## REFERÊNCIAS

AARSEN, van den F. G.; BECNACKCRS, A. A. C. M.; SWAAIJ, Van W. P. M. Thermochemical gasification in a pilot plant fluidized bed wood gasifier. **Proceeding of Energy from Biomass conference. E. C. Conference**, p. 425-430, 1983.

AIGNER, M. LCV gas turbines - requirements, status, results. **Analysis and Coordination of the Activities Concerning a Gasification of Biomass (AIR3-CT94-2284)**. Workshop. Espoo, Finland, 1996.

ALVES, L. L.; ÁLVAREZ, R.; MARQUES, L.; RUBIO, S. J.; RODERO, A.; QUINTERO, M. C. Modeling of an axial injection torch. **The European Physical Journal Applied Physics**. Vol. 46, 2009, 10 p.

ANDRADE, R. V. **Gaseificação de biomassa: uma análise teórica e experimental**. 2004. p. 227. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Itajubá, Itajubá.

ANGELES, P. J. P. **Estudo de tochas de plasma através da teoria da similaridade**. 2003. p. 100. Dissertação (Mestrado em física) - Instituto de Física "Gleb Wataghin", Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

ANIS, S.; ZAINAL, Z. A. Tar reduction in biomass producer gas via mechanical catalytic and thermal methods: a review. **Renewable and sustainable energy reviews**. Vol. 15, 2011, p. 2355-2377.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM E1534-93**. Standard Test Method for Determination of Ash Content of Particulate Wood Fuels, 2 p., 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM E341-08**. Standard Practice for Measuring Plasma Arc Gas Enthalpy by Energy Balance, 4 p., 2008.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM E711-87**. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Refuse-Derived Fuel by the Bomb Calorimeter, 8 p. 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM E828-81**. Standard Test Method for Designating the Size of RDF-3 From its Sieve Analysis), 8 p., 2004.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM E871-82**. Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood Fuels, 2 p., 2006.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING MATERIALS, **ASTM E872-82**. Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels, 3 p., 2006.

ARENA, U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. **Waste Management**. Vol. 32, 2012, p. 625-639.

BAIN, R. L. **Biomass to chemicals and fuels: Science, technology and public policy**. National Renewable Energy Laboratory. 2006. 164 p.

BAKER, E. G.; BROWN, M. D. ELLIOTT, D. C.; MUDGE, L. K. Characterization and treatment of tars from biomass gasifier. **Summer National Meeting**. Denver, CO. 1988, p. 1-11.

BARATTELI, A. C. F. **Estudo de materiais para eletrodos de tochas de plasma**. 2004. p. 164. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Materiais) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Universidade de São Paulo, São Paulo.

BASU, P. **Biomass gasification and pyrolysis: practical design and theory**. Academic Press, 2010. 365 p.

BEHAINNE, J. J. R. **Diminuição de H<sub>2</sub>S na gaseificação de carvão mineral mediante adição de dolomita em reator de leito fluidizado**. 1999. p. 173. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BEHAINNE, J. J. R.; SÁNCHEZ, C. G. Gaseificadores: conceitos básicos. In: SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Editora Átomo, 2010. Capítulo, p. 393-422.

BEVINGTON, P. R.; ROBINSON, D. K. **Data Reduction and Error Analysis for the Physical Science**. New York: McGraw-Hill Science Engineering, 3 ed. 2002. 320 p.

BITYURIN, V. A.; FILIMONOVA, E. A.; NAIDIS, G. V. Simulation of naphthalene conversion in biogas initiated by pulsed corona discharges. **IEEE Transactions on Plasma Science**. Vol. 37, n. 6, 2009, p. 911-919.

BIZZO, W. A. Purificação do produto de gaseificação de biomassa. In: SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Editora Átomo, 2010. Capítulo 19, p. 393-422.

BOLOGA, A.; HORNING, A.; SEIFERT, H.; WOLETZ, K.; PAUR, H. R. Applications of space-charge electrostatic precipitator for collection of oil mist from pyrolysis gases. **IEEE International Conference on Dielectric Liquids**, Poitiers. França, 2008.

BOULOS, M. I.; FAUCHAIS, P.; PFENDER, E. **Thermal plasmas: fundamentals and applications**. Plenum press. 1994, vol 1. 452 p.

BRATSEV, A. N.; POPOV, V. E.; RUTBERG, A. F.; SHTENGEL, S. V. A facility for plasma gasification of waste of various types. **High temperature**. Vol. 44, ed. 6, 2006, p. 823-828.

BRIDGWATER, A. V. The technical and economic feasibility of biomass gasification for power generation. **Fuel**. Vol. 14, 1995, p. 631-53.

BRIDGWATER, A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 38, 2012, p. 68-94.

BRITO, J. O.; BARRICHELO, L. E. G. Característica do eucalipto como combustível: análise química imediata de madeira e da casa. **Scientia Florestalis**. Vol. 16, 1978, p. 63-70.

CAMARGO, F. L. **Estudo da pirólise rápida de bagaço de cana em reator de leito fluidizado borbulhante**. 2006. p. 293. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

CARVALHO, L. P. M; POPPE, M.K. Desafios da pesquisa, desenvolvimento e inovação em biocombustíveis. In: CORTEZ, L.A.B. **Bioetanol de cana-de-açúcar: P&D para produtividade e sustentabilidade**. Ed. Blucher. São Paulo.2010. Capítulo 4, p. 27-33.

CEN/BT/TF 143. **Biomass Gasification - Tar and Particls in Product Gases - Sampling**

**and Analysis - Technical Report.** 44 p., 2005.

CHANG, J. Next generation integrated electrostatic gas cleaning systems. **Journal of Electrostatics.** Vol. 57, 2003, p. 273-291.

CHUNSHAN, Li. SUZUKI K. Tar property, analysis, reforming mechanism and model for biomass gasification - An overview. **Renewable And Sustainable Energy Reviews.** Vol. 13, 2009, p. 594-604.

CIFERNO, J. P.; MARANO, J. J. **Benchmarking biomass gasification Technologies for fuels, chemicals and hydrogen production.** U.S. Department of Energy National Energy Technology Laboratory. 2002. 65p.

COLL, R.; SALVADÓ, J.; FARRIOL, X.; MONTANÉ, D. Steam reforming model compounds of biomass gasification tars: conversion at different operating conditions and tendency towards coke formation. **Fuel Processing Technology.** Vol. 74, 2004, p.19-31.

COUTINHO, A. C. **Pirólise do gás natural utilizando uma tocha de plasma de arco não-transferido com argônio como gás de trabalho.** 2007. p. 91. Dissertação (Mestrado em Ciências Físicas) - Centro de Ciências exatas, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

DEVI, L.; PTASINSKI K. J.; JANSSEN F. J. J. G. Pretreated olivine as tar removal catalyst for biomass gasifiers: investigation using naphthalene as model biomass tar. **Fuel Processing Technology.**

ESIBYAN, E. **Plasma-arc equipment.** Moscow: Mir Publishers, 1978.

FERNANDES, M. C. **Investigação experimental de gaseificação em leito fluidizado.** 2004. p. 130. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

FITZPATRICK, R. **Plasma physics.** The University of Texas at Austin. 2011. 210 p.

FOURCAULT, A.; MARIAS, F.; MICHON, U. Modelling of thermal removal of tars in a high temperature stage fed by a plasma torch. **Biomass and Bioenergy.** Vol. 34, 2010, p. 1363-1374.

GERDART, D. **Gas Fluidization Technology**. Wiley & Sons Ltd, 1986, 468 p.

GEROSA, T.M. **O estudo da utilização do gás natural como insumo para a indústria química e petroquímica: modelagem de uma planta gás-química**. 2007. p. 155. Dissertação (Mestrado em Energia). - Instituto de Eletrotécnica e Energia, Universidade de São Paulo, São Paulo.

GODOY, P. H. **Construção de um equipamento de plasma de arco DC para múltiplos fins**. 1997. p. 108. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GODOY, P. H. **Plasma térmico para recuperação de insumos de valor em escórias e resíduos**. 2001. p. 135. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

GÓMEZ, E. O. **Projeto, construção e avaliação preliminar de um reator de leito fluidizado para gaseificação de bagaço de cana-de-açúcar**. 1996. p. 200. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade de Campinas, Campinas.

GRAY, D.; TOMLINSON, G.; BERGER, M. **Techno-economic assessment of biomass gasification technologies for fuels and power**. MITRE Corporation for The National Renewable Energy Laboratory. 1996.

HAN, J.; KIM, H. The reduction and control technology of tar during biomass gasification/pyrolysis: an overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**. Vol. 12, 2008, p. 397-416

HASLER, P.; NUSSBAUMER, Th. Gas cleaning for IC engine applications from fixed bed biomass gasification. **Biomass and Bioenergy**.

HEESCH, van B. E. J. M.; PEMEN, G. A. J. M.; YAN, K.; PAASEN, S. V. B. van; PTASINSKI, K. J.; HUIJBRECHTS, P. A. H.J. Pulsed corona tar cracker. **IEEE transactions on Plasma Science**. Vol. 28, n. 5, 2000.

HYPERTHERM. Powermax1250. **Plasma Arc Cutting System - Service manual 803940 -**

**Revision 4.** Hypertherm, Inc. Hanover, USA. 2006.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentals of heat and mass transfer.** Editora Wiley, 2006. 999p.

INTERNATIONAL STANDARDIZATION ORGANIZATION, **ISO 9096:2003.** Stationary Source Emissions - Manual determination of mass concentration of particulate matter, 52 p., 2003.

JENKINS, B. M. **Fuel properties for biomass materials.** In: International Symposium on Application of Energy in Agriculture. 1990, Delhi, India.

JUNIOR, C. G. Z. **Geração de hidrogênio e negro de fumo pela pirólise do gás natural utilizando uma tocha de plasma.** 2006. p. 86. Dissertação (Mestrado em Física) - Centro de Ciências Exatas, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória.

JUSTINIANO, L. S.; MACIEL, A. S.; MASSI, M.; SOBRINHO, A. S. **Estudo de um reator a plasma por micro-ondas para obtenção de gás de síntese a partir de gás natural.** In: Anais do XIV ENCITA. 2008.

JUSTINIANO, L. S.; MACIEL, A. S.; SOBRINHO, A. S.; SAGÁS, J. C.; MARQUESI, A. R. **Montagem e caracterização de um reformador a plasma de micro-ondas para tratamento de gases.** In: Congresso Brasileiro de Aplicações de Vácuo na Indústria e na Ciência (CBRAVIC). 2010, Campos do Jordão, São Paulo, São Paulo, Brasil.

LAURENCE, J. C. ASHENAFI. Syngas treatment unit for small scale gasification - application to IC Engine gas quality requirement. **Journal of Applied Fluid Mechanics.** Vol. 5, 2012, p.95-103.

KALTSCHMITT, M., HARTMANN. **Energie aus biomass: Grundlagen, Techniken und Verfahren.** Springer Verlag, 2001.

KUMAR, A.; JONES, D. D.; HANNA, M. A. Thermochemical biomass gasification: a review of the current status of the technology. **Energies.** Vol. 2, 2009, p. 556-581.

KUNII, D; LEVENSPIEL, O. Fluidization engineering. New York: John Wiley

MACIEL, H. S. **Aplicações de plasmas em sistemas energéticos**. Trabalho apresentado na I - Escola de Combustão, Belém, PA, 2007.

MAROTTA, A.. Tochas de plasma: questões básicas. In: Congresso Brasileiro de Física dos Plasmas. **Anais do Congresso Brasileiro de Física dos Plasmas**. 1991. Vol. 1, p. 228-241.

MENG, X.; JONG, W.; FU, N.; VERKOOIJEN, A. H. M. Biomass gasification in a 100 kWth steam-oxygen blown circulating fluidized bed gasifier: effects of operational conditions on product gas distribution and tar formation. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 35, 2011, p. 2910-2924.

MILLER, B. G.; TILLMAN, D. A. C. **Combustion Engineering: Issues for Solid Fuels**. Elsevier, San Diego, USA, 2008. 502 p.

MILNE, T. A.; ABATZOGLOU, N. **Biomass gasifiers "tars": their nature, formation, and conversion**. National Renewable Energy Laboratory, 1998, 204 p.

MOORE, D. S. **A estatística básica e sua prática**. Editora LTC, 2005. 658 p.

MOREIRA, R. M.; ANDERSEN, S. L. F. Controle de emissões. In: NOGUEIRA, M .F. M. **Conversão de resíduos em energia**. III Escola de Combustão, Salvador - BA. 2011. Capítulo 8, p.183-207.

MORITA, E. S. **Estudo experimental das emissões de NOx da combustão de carvão mineral brasileiro em leito fluidizado rápido**. 2009. p. 205. Dissertação (Mestrado em Engenharia) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

NAIR, S. A.; PEMEN, A. J. M.; YAN, K.; GOMPEL, F. M. van; LEUKEN, H. E. M. van; HESCH, E. J. M. VAN; PTASINSKI, K. J.; DRINKENBURG, A. A. H. Tar removal from biomass-derived fuel gas by pulsed corona discharges. **Fuel Processing Technology**. Vol. 84, 2003, p. 161-173.

ODA, T. Non-thermal plasma processing for environmental protection: decomposition of dilute VOCs in air. **Journal of Electrostatics**. Vol. 57, 2003, p. 293-311.

PELLEGRINI, L. A.; SOAVE, G.; GAMBA, S.; LANGÈ, S. Economic analysis of a combi-

ned energy-methanol production plant. **Applied Energy**. Vol. 88, 2011, p. 4891-4897.

PELLEGRINO, R. **Gaseificação de carvão mineral com adição de vapor e remoção de H<sub>2</sub>S, em leito fluidizado**. 2006. p. 146. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

PÉCORÁ, A. A. B. **Estudo da fluidodinâmica de leitos fluidizados circulantes com injeção de ar secundário**. 1995. p. 258. Doutorado (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

RAJU, A. S. K.; PARK, C. S.; NORBECK, J. M. Synthesis gas production using steam hydrogasification and steam reforming. **Fuel Processing Technology**. Vol. 90, 2008, p. 330-336.

RAŽNJEVIĆ, K. **Tables et diagrammes thermody**. Editora Eyrolles, 1970. 364p.

ROSS, S. **A first course in probability**. Editora Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall, 2001. 528 p.

ROTH, J. R. **Industrial plasma engineering. Volume 1: principles**. Editora Institute of Physics Publishing. 1995. 538p.

RUTBERG, PH. G. Plasma pyrolysis of toxic waste. **Plasma Physics and Controlled Fusion**. Vol. 45, 2003, p.957-969.

RUTBERG, PH. G.; BRATSEV, A. N.; KUZNETSOV, V. A.; POPOV, V. E.; UFIMTSEV, A. A.; SHTENGEL, S. V. On efficiency of plasma gasification of wood residues. **Biomass and Bioenergy**. Vol. 35, 2011, p. 495-504.

SANTOS, J. F. dos. Fluidodinâmica do leito fluidizado, aplicada à gaseificação. In: SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Editora Átomo, 2010. Capítulo 14, p. 263-279.

SANCHEZ, E. M. S. Alcatrão ou bio-óleo: caracterização, amostragem e utilização. In: SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Editora Átomo, 2010. Capítulo 17, p. 257-262.

SÁNCHEZ, C. G. Gaseificação. In: SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Editora Átomo, 2010. Capítulo 13, p. 257-262.

SÁNCHEZ, C. G. **Estudo da volatilização e da gaseificação de biomassa**. 1994. p. 175. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

SÁNCHEZ, C. G.; LORA, E. S.; GÓMEZ, E. O. Gaseificação. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Editora da Unicamp, 2008. Capítulo IX, 736p.

SÁNCHEZ, E. M. S. Alcatrão ou bio-óleo: caracterização, amostragem e utilização. In: SÁNCHEZ, C. G. **Tecnologia da gaseificação de biomassa**. Editora Átomo, 2010. Capítulo 17, p. 353-385.

SHIE, J. L.; CHANG, C. C.; CHANG, C. Y.; TZENG, C. C.; WU, C. Y.; LIN, K. L.; TSENG, J. Y.; YUAN, M. H.; LI, H. Y.; KUO, C. H.; YU, Y. J.; CHANG, L. C. Co-pyrolysis of sunflower-oil cake with potassium and zinc oxide using plasma torch to produce bio-fuels. **Bioresource Technology**. Vol. 102, 2011, p. 11011-11017.

SOUZA-SANTOS, M. L. de. **Solid Fuels Combustion and Gaseification - Modeling, Simulation, and Equipment Operation**. Marcel Dekker, Inc., 2005, 462 p.

STEYNBERG, A.; DRY, M. **Fischer-Tropsch Technology**. Elsevier Science and Technology Books, 2004, 689 p.

TAO, K.; OHTA, N.; LIU, G.; YONEYAMA, Y.; WANG, T.; TSUBAKI, N. Plasma enhanced catalytic reforming of biomass tar model compound to syngas. **Fuel**. Disponível online, 2010.

TEIXEIRA, F. N.; PRIMO, K. R.; LORA, E. E. S. Impacto ambiental do uso energético da biomassa e tecnologias para o controle de emissões. In: CORTEZ, L. A. B.; LORA, E. E. S.; GÓMEZ, E. O. **Biomassa para energia**. Editora Unicamp, 2008. Capítulo 20, p. 645-670.

THAMBIMUTHU, K. V. **Gas cleaning for advanced coal-based power generation**. IEA Coal Research. 1993. 163 p.

WHITE, R. H.; DIETENBERGER, M. A. Wood products: thermal degradation and fire. In: BUSCHOW, K. H. J.; CAHN, R. W.; FLEMING, M. C.; ILSCHNER, B.; KRAMER, E. J.; MAHAJAN, S. **Encyclopedia of material science and technology**. Editora Elsevier Science, 2001. p. 9712-9716

YURIENIEV, V. N.; LEBEDIEV, P. D. **Manual Termotécnico**. M. Energia, 1976.

ZHUKOV, M. F. Linear direct current plasma torches. **Thermal Plasma and New Materials Technology**. Vol. 1, 1994, p. 9-43.

ZUBERBÜLER, U. **Gasification of biomass - an overview on available**. RENEW - First European Summer School on Renewable Motor Fuels. Bikenfeld, Alemanha, 21p. 2005.

## APÊNDICE A Análise imediata

A análise imediata consiste em submeter em conhecer, de acordo uma sequência de etapas, as frações em massa de umidade, voláteis, cinzas e carbono fixo utilizando as seguintes normas de acordo com a Tabela A.1.

Tabela A.1: Normas ASTM para realização de análise imediata

Norma ASTM	Análise
E871-82 (2006) - Standard Test Method for Moisture Analysis of Particulate Wood fuels	Umidade
E872-82 (2006) - Standard Test Method for Volatile Matter in the Analysis of Particulate Wood Fuels	Voláteis
E1534-93 (2006) - Standard Test Method for Determination of Ash Content of Particulate Wood fuels	Cinzas

### Análise de umidade

A primeira análise a ser realizada na amostra é a análise imediata. Esta norma se aplica a combustíveis particulados de madeira: pellets, serragem, cavacos de árvore verde, destoca, madeira triturada ou qualquer tipo de combustível de madeira particulada de volume inferior a  $16,38 \text{ cm}^3$ . O procedimento para a realização da análise imediata é:

- 1) Secar os cadinhos na estufa a temperatura de  $103 \pm 1^\circ\text{C}$  por 30 min;
- 2) Esfriar no dessecador até temperatura ambiente;
- 3) Pesar com tampa e anotar em 1;
- 4) Encher os cadinhos até  $3/4$  do volume total;
- 5) Pesar com a tampa e anotar em 2;
- 6) Colocar os cadinhos destampados e as tampas na estufa por 16 horas na temperatura de  $103 \pm 1^\circ\text{C}$ ;
- 7) Colocar os cadinhos tampados no dessecador até atingir temperatura ambiente;

8) Pesar e anotar em 3;

9) Colocar na estufa por mais 2 horas na temperatura de  $103 \pm 1^\circ C$ ;

10) Colocar os cadinhos tampados no dessecador até atingir temperatura ambiente;

11) Retirar do dessecador e pesar imediatamente, se a diferença for inferior a 0,2 % do anotado em 2, ir para o item 12, caso contrário, repetir a partir do procedimento 9 até estabilizar o peso;

12) O cálculo do percentual de sólidos na amostra é:

$$\%sólidos = \left( \frac{P_f - P_c}{P_i - P_c} \right) 100 \quad (A.1)$$

em que  $P_i$  é o peso inicial da massa úmida com o cadinho tampado [g],  $P_f$  é o peso final da amostra seca e estabilizada com o cadinho tampado [g] e  $P_c$  é o peso do cadinho vazio e tampado [g].

13) O cálculo de umidade na amostra é:

$$\%umidade = 100\% - \%sólidos \quad (A.2)$$

14) Guardar as amostras no dessecador.

### **Análise de voláteis**

Após ser realizada a análise de umidade, realiza-se a análise de voláteis utilizando a mesma amostra. Esta norma utilizada se aplica a combustíveis particulados de madeira: pellets, serragem, cavacos de árvore verde, destoca, madeira triturada ou qualquer tipo de combustível de madeira particulada de volume inferior a  $16,38 \text{ cm}^3$ . Este método de teste determina a porcentagem de produtos gasosos, excluindo vapor de umidade, nas condições específicas do teste. O procedimento para a realização da análise de voláteis é:

1) Utilizar as amostras obtidas após a análise imediata;

2) Aquecer a mufla a  $950 \pm 20^\circ C$ ;

- 3) Colocar os cadinhos na mufla destampados por exatos 7 minutos;
- 4) Retirar os cadinhos e colocá-los tampados no dessecador até atingir temperatura ambiente;
- 5) Pesar e anotar em 4;
- 6) Guardar no dessecador;
- 7) O cálculo do percentual de voláteis é:

$$\% \text{Voláteis} = \left( \frac{P_i - P_f}{P_i - P_c} \right) 100 - A \quad (\text{A.3})$$

em que  $P_i$  é o peso inicial da massa seca com o cadinho tampado [g],  $P_f$  é o peso final da amostra volatilizada com o cadinho tampado [g],  $P_c$  é o peso do cadinho vazio e tampado [g] e  $A$  é a porcentagem de umidade da amostra calculada na etapa de análise de umidade [%].

### **Análise de cinzas**

Esta norma se aplica a combustíveis particulados de madeira: pellets, serragem, cavacos de árvore verde, destoca, madeira triturada ou qualquer tipo de combustível de madeira particulada de volume inferior a  $16,38 \text{ cm}^3$ . Este método de teste determina a porcentagem de cinzas no resíduo remanescente após a oxidação da amostra. O procedimento para a realização da análise de cinzas é:

- 1) Utilizar as amostras volatilizadas a análise de voláteis;
- 2) Colocar os cadinhos na mufla fria;
- 3) Aquecer a mufla lentamente até  $590 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ , com gradiente de aquecimento em aproximadamente duas horas;
- 4) Retirar os cadinhos e colocá-los tampados no dessecador até atingir temperatura ambiente;
- 5) Retirar do dessecador e pesar imediatamente;

6) Colocar na mufla por mais 30 minutos com temperatura de  $590 \pm 10 \text{ }^\circ\text{C}$ ;

7) Retirar os cadinhos e colocá-los tampados no dessecador até atingir temperatura ambiente;

Retirar do dessecador e pesar imediatamente, se a diferença do peso for inferior a  $0,2 \text{ mg}$  anotar em 5, caso contrário repetir a partir do procedimento 6 até estabilizar o peso;

18) Guardar no dessecador;

19) O cálculo do percentual de cinzas é:

$$\% \text{cinzas} = \left( \frac{P_z - P_c}{P_i - P_c} \right) 100 \quad (\text{A.4})$$

onde  $P_c$  é o peso do cadinho vazio e tampado [ $g$ ],  $P_i$  é o peso inicial da massa volatilizada com o cadinho tampado [ $g$ ] e  $P_z$  é o peso do cadinho tampado com as cinzas [ $g$ ].

### **Carbono fixo**

A determinação do teor de carbono fixo é feita por diferença entre a soma dos teores da análise de umidade, voláteis, cinzas e 100%, de acordo com a equação:

$$\% \text{carbono fixo} = 100\% - \% \text{umidade} - \% \text{voláteis} - \% \text{cinzas} \quad (\text{A.5})$$

## APÊNDICE B Poder calorífico

O procedimento para o cálculo do poder calorífico é descrito a seguir:

- 1) Corte um fio de algodão de 15 *cm* e pese;
- 2) Corte um pedaço de fio de ignição (níquel-cobre) de aproximadamente 12 *cm*;
- 3) Pese a quantidade de combustível;
- 4) Ajuste o fio de ignição na haste da bomba;
- 5) Ajuste o cadinho nos eletrodos da bomba e enrole o fio de algodão no fio de ignição e deixe embebedar no combustível;
- 6) Utilizando uma pipeta graduada, adicione 1 ml de água destilada no fundo da bomba;
- 7) Introduza o cadinho com o combustível na bomba e feche;
- 8) Pressurize a bomba com oxigênio até 30 *bar*;
- 9) Introduza 2700 *mL* de água na camisa interna da bomba;
- 10) Ajuste o agitador nesse recipiente para que não encoste em nenhuma parte interna da camisa;
- 11) Deposite a bomba no fundo da camisa e ligue as garras de ignição nos eletrodos;
- 12) Ajuste os termômetros para leitura da temperatura da água da camisa externa;
- 13) Ligue o agitador e o vibrador do termômetro;
- 14) Efetue inicialmente a leitura dessas temperaturas em intervalos de 60 segundos até completar os 300 segundos citado acima;

15) Efetuar a ignição da bomba no início do sexto segundo (segure o botão de queima durante 5 segundos);

16) Medir as temperaturas da água em intervalos de 30 segundo;

17) Parar as leituras quando atingir temperatura constante da água ao redor da bomba por 300 segundos;

18) Remova a bomba, despressurize-a a velocidade uniforme de modo que a operação nunca seja inferior a 60 segundos;

19) Examine o interior da bomba para verificar se houve combustão completa. Despreze o ensaio se encontrar amostras queimadas incompletamente e repita novamente as operações;

20) Lave o interior da bomba, incluindo os eletrodos e o suporte da amostra, com um jato fino de água deionizada e recolha tudo em um béquer;

21) Titule a água de lavagem com solução de alcali padrão usando o indicador;

22) Remova e meça as partes do fio de ignição não queimado;

23) Faça os cálculos.

O poder calorífico inferior (PCI) é calculado da seguinte forma (Sánchez, 1994):

$$PCI = PCS - 0,21214H \quad (\text{B.1})$$

em que  $PCI$  é o poder calorífico superior [ $MJ.kg^{-1}$ ] e  $H$  é o teor de hidrogênio no combustível em base seca [%].

Para encontrar o valor do poder calorífico superior (PCS) em calorias por grama do combustível, utiliza-se a equação abaixo:

$$PCS = \frac{tA - e_1 - e_2 - e_3}{m} \quad (\text{B.2})$$

em que  $t$  é a elevação de temperatura corrigida calculada [ $^{\circ}C$ ],  $A$  é o equivalente em água do calorímetro [ $cal.^{\circ}C^{-1}$ ],  $m$  é a massa da amostra [ $g$ ],  $e_1$  é a correção para o calor de formação do ácido nítrico em calorias, ou seja, é a quantidade em mililitros de solução de alcali padrão usado na titulação do ácido [ $mL$ ],  $e_2$  é relação 14(porcentagem de enxofre na amostra)(peso da amostra em grammas),  $e_3$  é a relação 2,3(comprimento do fio de ignição consumido em centímetros).

Para o cálculo de  $t$  é utilizada a seguinte equação:

$$t = t_c - t_a - r_1(b - a) - r_2(c - b) \quad (B.3)$$

em que  $a$  é o instante de ignição [ $s$ ],  $b$  é o tempo em que a elevação de temperatura alcança 60 % [ $s$ ],  $c$  é o tempo de início do período no qual a variação de temperatura com o tempo se torna constante [ $s$ ],  $t_a$  é a temperatura no momento de ignição [ $^{\circ}C$ ],  $t_c$  é a temperatura no tempo [ $c$ ],  $r_1$  é a razão na qual a temperatura se elevou durante o período de 300  $s$  antes da ignição [ $^{\circ}C.s^{-1}$ ] e, por fim,  $r_2$  é a razão na qual a temperatura variou durante o período de 300  $s$  após o tempo  $c$  [ $^{\circ}C.s^{-1}$ ].

A Figura B.1 apresenta o esquema do equipamento contendo a bomba calorimétrica, recipiente da bomba, banho externo, termômetros e acessórios enquanto que a Figura B.2 mostra a bomba calorimétrica.

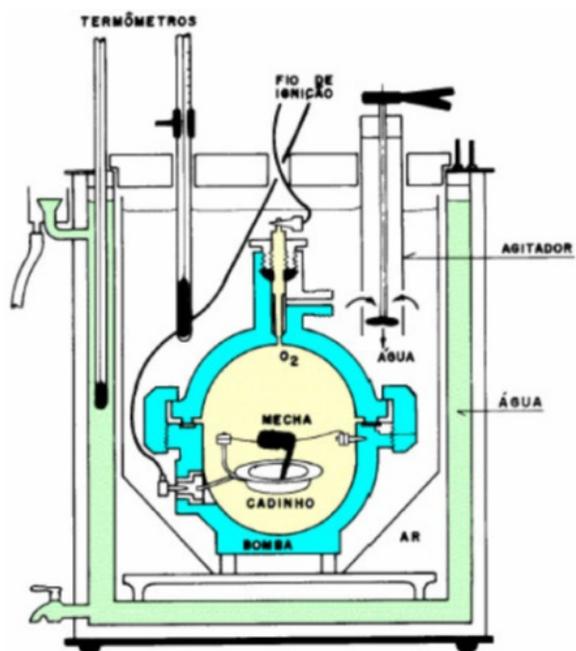


Figura B.1: Esquema da bomba calorimétrica.



Figura B.2: Foto da bomba calorimétrica.

## APÊNDICE C Cromatografia gasosa

Este apêndice apresenta o manual de procedimento operacional utilizado neste trabalho para análise do gás no cromatógrafo. O software utilizado foi o PeakSimple, versão 3.93, desenvolvida pela SRI Instruments-USA. A seguir encontra-se o procedimento operacional do software utilizado:

1) O primeiro passo é ajustar todos os parâmetros de configuração do software, de forma que se obtenha o melhor desempenho de análise e integração, para isso clique em "Edit", posteriormente, em "Channels". Será apresentada a seguinte tela:

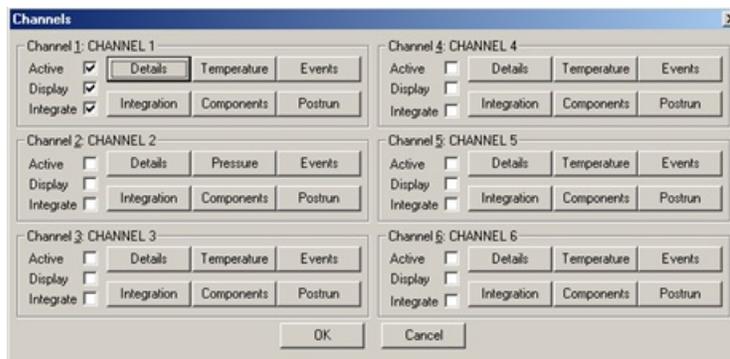


Figura C.1: Canais.

2) Se o seu software possuir apenas um canal (o que é suficiente para a maioria das análises) ative as opções "Active", "Display" e "Integrate", referente ao canal 1. Caso possua mais de um canal ative as opções referentes aos outros canais e clique em "OK";

3) Ainda na tela "Channels" clique sobre o botão "Details" e visualizará a tela abaixo:

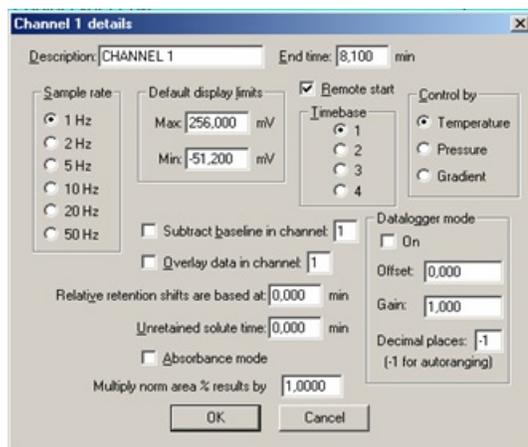


Figura C.2: Detalhes.

4) No momento da instalação do software, um técnico estabelecerá os melhores valores para que seu equipamento adquira a melhor performance possível. Registre estas configurações e guarde em local de fácil acesso para consultas futuras;

5) Retornando a tela "Channels" clique no botão "Integration". Os valores de "Peak" e "Base Line" serão estabelecidos na instalação, bem como os outros parâmetros. No item "Area Reject" será estabelecido um valor inicial, mas você pode alterá-lo conforme a necessidade de sua análise cromatográfica;

6) Após a injeção de um padrão ou amostra, você deve dar início ao "Run" acionando a tecla espaço no teclado. Caso queira encerrar a análise tecle end;

7) Após a injeção do padrão, você obterá um cromatograma conforme o exemplo abaixo:

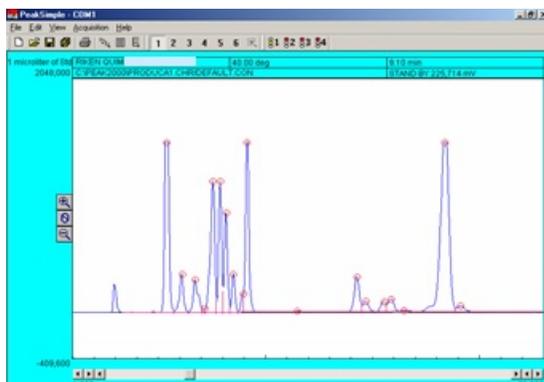


Figura C.3: Cromatograma.

8) Para adicionar nome ao pico que desejar, clique com o botão direito do mouse bem em cima do círculo apresentado na ponta dos picos. Em seguida selecione a opção "Add Component";

9) Logo em seguida, acima do pico, você poderá visualizar o tempo de retenção. Repita a mesma operação em todos os picos. Repare que surgirão traços acima ou sobre os picos;

10) Agora você precisa identificar cada pico e dar os nomes dos componentes a quem eles se referem. Para isso, clique novamente com o botão direito do mouse em cima do círculo localizado na ponta do pico e clique em "Edit Component";

11) Em "Peak number" determine o número de identificação do pico (1, 2, 3, entre outros);

12) Em "Peak name", digite o nome do componente (metano, hidrogênio, entre outros);

13) Em "Start" e "End" estarão pré-estabelecidos os limites de tempo inicial e final, conforme citado anteriormente. Caso os picos do cromatograma sejam muito juntos pode haver a necessidade de pequenas alterações nesses tempos. Por exemplo, se o pico 1 tem tempo inicial de 1,00 e final de 1,50 o tempo inicial do pico 2 deve ser no mínimo 1,51, pois pode haver sobreposição dos picos;

14) Em "Internal standard" digite a concentração do componente;

15) Em "Units", digite a unidade de concentração em que foi preparado o gás padrão (*ppm*,  $mg \cdot 100mL^{-1}$ , entre outros);

16) Depois de concluído todos os picos, você deverá ter um cromatograma como no exemplo abaixo:

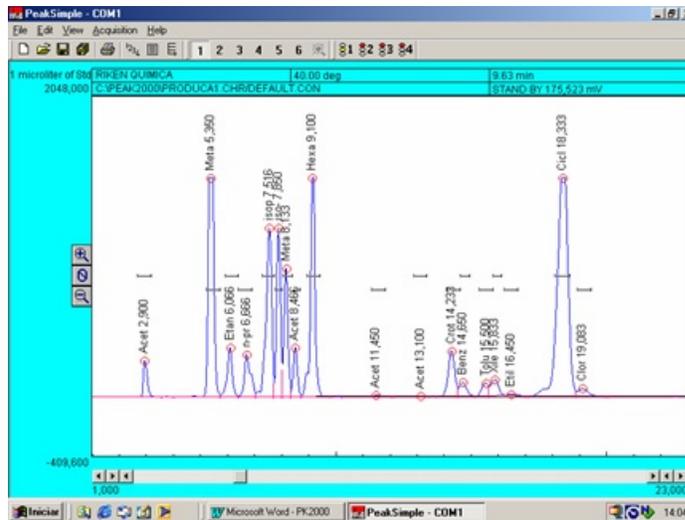


Figura C.4: Cromatograma final.

17) Agora que todos os picos estão identificados e nomeados, é necessário a formatação de uma tabela de calibração para que os valores de área sejam relacionados com as quantidades injetadas na amostra;

18) Clique em "View" e "Results", onde você poderá visualizar todos os componentes, suas áreas e suas concentrações "External" com valor 0 (zero), conforme abaixo:

Component	Retention	Area	Height	External	Units
Acetona	2,900	2277,2000	247,930	0,0000	ppm
Metanol	5,350	22057,5970	1490,769	0,0000	ppm
Etanol	6,066	4052,2400	332,039	0,0000	ppm
n-propanol	6,666	4323,3140	298,028	0,0000	ppm
isopropanol	7,516	15311,5705	1149,466	0,0000	ppm
iso-butanol	7,850	10280,8010	1150,265	0,0000	ppm
Melanona	8,133	8346,0500	873,094	0,0000	ppm
Acetal	8,466	3121,5770	334,294	0,0000	ppm
Hexano	9,100	17059,7525	1487,512	0,0000	ppm
Acetato de Etila	11,450	164,4000	8,733	0,0000	ppm
Acetato de Butila	13,100	50,2000	2,873	0,0000	ppm
Crtonaldeido	14,233	5072,3240	309,348	0,0000	ppm
Benzeno	14,650	1583,1135	93,360	0,0000	ppm
Tolueno	15,500	1405,3200	85,859	0,0000	ppm
Xileno	15,833	2040,0125	110,906	0,0000	ppm
Etileno Glicol	16,450	218,8000	10,049	0,0000	ppm
Ciclo-propano	18,333	40979,8300	1487,300	0,0000	ppm
Clorobenzeno	19,083	1282,8000	51,700	0,0000	ppm
		139656,9020		0,0000	

Figura C.5: Valores do cromatograma.

19) Selecione as opções "Recognized peaks only" e "Undetected components also";

20) Clique em "Calibrate all" e, em seguida, "OK" para "Recalibration level" estipulado em 1, como em:

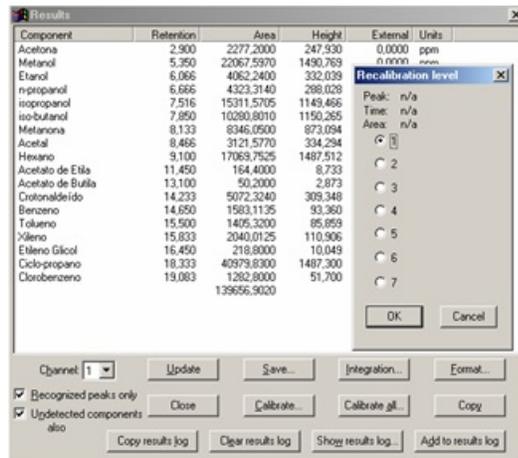


Figura C.6: Calibração total.

21) Selecione o primeiro componente, clique em "Calibrate" e "OK" para "Recalibration level" estipulado em 1 conforme abaixo:

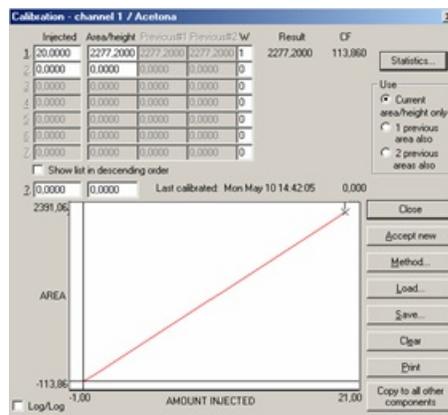


Figura C.7: Calibração unitária.

22) No campo "Inject" digite a concentração do padrão utilizado e no campo "W" digite 1 e poderá perceber a formação de uma curva de calibração deste componente;

23) Clique em "Save" e dê um nome ao arquivo desta curva;

24) Repita este passo para todos os componentes da tabela;

25) Após salvar todos os componentes, feche as janelas de "Calibration" e "Results", clique em "Edit", "Channels" e "Components". A janela apresentada será:

Peak	Name	Start	End	Calibration
1*	Acetona	2,600	3,180	Acetona.cal
2*	Metanol	5,220	5,720	Metanol.cal
3*	Etanol	5,300	6,400	Etanol.cal
4*	n-propanol	6,400	6,500	Npropanol.cal
5*	isopropanol	7,270	7,720	ISopropanol.cal
6*	iso-butanol	7,760	8,030	ISObutanol.cal
7*	2-butanona	8,040	8,410	2Butanona.cal
8*	Acetal	8,420	9,530	Acetal.cal
9*	Hexano	9,920	9,420	Hexano.cal
10*	Acetato de Eti	11,330	11,830	AcetEtila.cal
11*	Acetato de But	12,880	13,380	AcetButila.cal
12*	Crotonaldeido	14,100	14,600	Croto.cal
13*	Benzeno	14,510	14,250	Benzeno.cal
14*	Tolueno	15,300	15,800	Tolueno.cal
15*	Xileno	15,810	16,120	Xileno.cal
16*	Etileno Glicol	16,220	16,720	EtilGlicol.cal
17*	Ciclopropano	18,100	18,620	Ciclopropano.c

Figura C.8: Detalhes dos componentes analisados.

26) Note que a coluna "Calibration" possui os nomes dos arquivos salvos de cada componente;

27) Clique em "Save" e determine um nome específico para esta curva;

28) Conhecendo os valores de área e concentração do gás padrão e área da amostra, pode-se calcular a concentração da amostra em porcentagem por proporcionalidade. Com as concentrações de amostras de  $CO$ ,  $H_2$  e  $CH_4$ , calcula-se o poder calorífico inferior do gás, que é dado por:

$$PCI_g = \sum_{i=1}^n X_i PCI_i \quad (C.1)$$

em que  $PCI_g$  é o poder calorífico inferior do gás [ $MJ.Nm^{-3}$ ],  $X_i$  é a fração molar do componente  $i$  do gás analisado,  $PCI_i$  é o poder calorífico inferior do componente  $i$  em que  $PCI_{CO} = 12,6 MJ.Nm^3$ ,  $PCI_{H_2} = 10,7 MJ.Nm^3$  e  $PCI_{CH_4} = 35,8 MJ.Nm^3$ .

## APÊNDICE D Sistema de coleta de alcatrão e material particulado

Este apêndice refere-se ao sistema de análise de alcatrão e particulado de acordo com a norma do documento CEN/BT/TF 143 - "Biomass gasification - Tar and particules in product gases - sampling and analysis".

O alcatrão no gás de gaseificação a partir da biomassa é formado pela decomposição térmica deste material quando submetido a condição abaixo da estequiométrica. Este gás pode ser utilizado para produzir eletricidade, calor, gases ou combustíveis líquidos. Já o alcatrão proveniente da gaseificação de combustíveis fósseis são similares ao alcatrão obtido a partir da biomassa. Em ambos os tipos de alcatrão, esta norma pode ser utilizada para medir a quantidade de alcatrão e particulado presentes no gás de gaseificação

A norma para análise de alcatrão e particulado se refere as especificações técnicas que já foram publicadas. Basicamente, as referências utilizadas nesta norma estão especificadas na Tabela D.1.

Tabela D.1: Normas utilizadas para o documento de análise de alcatrão e particulado

Abreviação	Nome
EN 13284-1:2001	Stationary source emission - Determination of low range mass concentration of dust - Part 1: Manual gravimetric method
ISO 5725-1:1994 (corrigida em 1998)	Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results - Part 1: General principles and definitions
ISO 5725-2:1994 (corrigida em 2002)	Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and repeatability and reproducibility of a standard measurement method
ISO 9096:2003	Stationary source emission - Manual determination of mass concentration of particulate matter

Esta norma apresenta um método de amostragem e análise de alcatrão e particulado para determinar a quantidade destes componentes no gás de gaseificação. As especificações técnicas da

gaseificação para utilização desta norma é aplicável para algumas faixas de concentrações como de 1 a 300  $g.Nm^3$  para o caso do alcatrão e de 20 a 30  $g.Nm^{-3}$  para o de particulados, sendo que a gaseificação tem que ocorrer em temperatura abaixo de 1173  $K$  e pressões na faixa de 60 a 6000  $kPa$ .

O princípio do método da análise de alcatrão e particulado baseia-se na amostragem de uma extração contínua de uma parte representativa do gás de gaseificação sob condição isocinética. A Figura D.1 apresenta um esquema básico da sonda isocinética instalado dentro do tubo de passagem do gás de gaseificação.

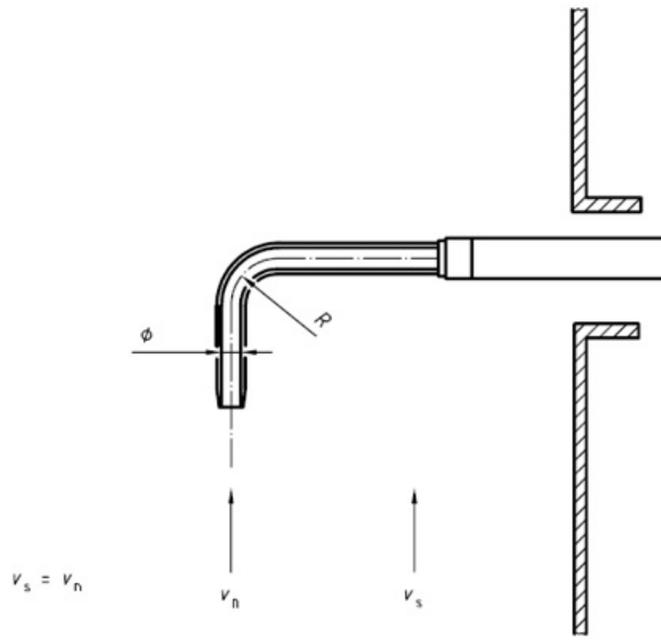


Figura D.1: Sonda isocinética instalado no tubo de passagem do gás de gaseificação em que  $v_n$  é a velocidade do bocal ("nozzle"),  $v_s$  é a velocidade do gás de gaseificação ("sample"),  $R$  é o raio interno do cotovelo e  $\phi$  é o diâmetro interno da sonda.

Para que a condição seja isocinética:

$$v_s = \frac{\dot{V}_s}{A_s} = \frac{\dot{V}_g}{A_g} = v_g \quad (D.1)$$

em que  $v_s$  é a velocidade na sonda [ $m.s^{-1}$ ],  $v_g$  é a velocidade do gás de gaseificação no tubo [ $m.s^{-1}$ ],  $\dot{V}_s$  é a vazão volumétrica na sonda [ $Nm^3.s^{-1}$ ],  $\dot{V}_g$  é a vazão volumétrica no gaseificador

$[Nm^3.s^{-1}]$ ,  $A_s$  é a área da sonda  $[m^{-2}]$  e  $A_g$  é a área do tubo  $[m^{-2}]$ .

Corrigindo para a temperatura de operação:

$$v_{cs} = \frac{T_s}{273,15} v_s \quad (D.2)$$

em que  $v_{cs}$  é a velocidade corrigida na sonda  $[m.s^{-1}]$  e  $T_s$  é a temperatura corrigida na sonda  $[K]$ .

Portanto:

$$A_s = \frac{\dot{V}_s}{v_{cs}} \quad (D.3)$$

Para que a sonda seja aplicável na coleta de alcatrão e particulado, o diâmetro mínimo da sonda deve ser de 4 mm de acordo com a norma apresentada.

A Tabela D.2 apresenta os dados do projeto para o bocal da sonda isocinética.

Tabela D.2: Dados de projeto para diâmetro interno da sonda isocinética

Parâmetro	Valor	Unidade
Diâmetro do tubo	$50,80.10^{-3}$	<i>m</i>
Área do tubo	$2027.10^{-6}$	$m^2$
Vazão volumétrica do gaseificador	$2200.10^{-6}$	$Nm^3.s^{-1}$
Vazão volumétrica do sistema isocinético	$27.10^{-6}$	$Nm^3.s^{-1}$
Velocidade na sonda	1,09	$m.s^{-1}$
Temperatura de operação	673	<i>K</i>
Velocidade corrigida	6,75	$m.s^{-1}$
Área do bocal	$14,38.10^{-6}$	$m^2$
Diâmetro do bocal	$0,43.10^{-3}$	<i>m</i>

A determinação de alcatrão e particulados em produtos de gaseificação de biomassa gases é realizada em duas etapas: amostragem e análise. Estas que serão abordadas a seguir.

Amostras de alcatrão e partículas são coletadas na saída do reator de gaseificação, de tal modo que nenhum gás pode escapar do sistema ou entrar, garantindo assim a estanqueidade do mesmo. O alcatrão é coletado em garrafas do tipo impinger que estão aquecidas ou refrigeradas. O

volume de gás amostrado é medido sob condições isentas de umidade por meio de um rotâmetro e tempo de amostragem. As amostras são preparadas no local e então armazenadas até que possam ser analisadas por gravimetria. Deve-se pesar todo o sistema de amostra: mangueiras, conexões em T, filtros e vidrarias.

Dois métodos são utilizados para a análise de alcatrão e particulado: gravimetria e cromatografia. Dependendo da análise e informação desejada, pode-se escolher qualquer um dos dois ou ambos os métodos sendo que as duas análises não são complementares. Além disso, o método gravimétrico não é adequado para gases com concentrações baixas de alcatrão.

O bocal de coleta da amostra do gás deve ser instalado em um ponto na linha que contenha um trecho reto livre de perturbações, sendo recomendado que não haja pontos de singularidade a 5 diâmetros a montante e 3 diâmetros a jusante do ponto de amostragem.

Antes de se iniciar a amostragem deve ser realizado o teste de estanqueidade do sistema a fim de garantir que não haja interferência por infiltração no gás coletado e, também, deve-se ser injetado nitrogênio na sonda a fim de limpá-la de resíduos de partículas que possam ter se acumulado antes do início do teste. Antes de todo ensaio, é preciso limpar a sonda para evitar entupimentos imprevistos.

A amostragem deve ser conduzida sob uma condição estável de operação do reator durante toda sua realização (regime permanente de operação). Deve ser considerado como ponto principal de reprodutibilidade dos ensaios a temperatura do leito do reator, vazão de ar e alimentação de biomassa.

É recomendado que a amostragem seja conduzida pelo menos por um período de 10 minutos ou até que condições, como entupimento do filtro ou mangueira, exijam a interrupção do teste.

Com o término do teste e tendo sido realizada a coleta do material, deverá ser realizada a análise gravimétrica.

## APÊNDICE E Roteiro básico de operação do gaseificador

Neste apêndice foi realizado um roteiro de operação do gaseificador em leito fluidizado utilizado neste trabalho. Para isto, suponha inicialmente que o reator esteja com o material inerte, o silo esteja carregado com combustível a ser gaseificador, o sistema de aquisição de dados e o cromatógrafo estejam funcionando adequadamente. Neste roteiro é apresentado o procedimento, possível problema, provável causa e solução somente para as etapas que envolvem o processo de ignição, gaseificação e desligamento do sistema. A Tabela E.1 apresenta o roteiro básico de operação do gaseificador.

Tabela E.1: Roteiro básico de operação do gaseificador - Roteiro 1-6

(Continua)

Roteiro	Procedimento	Possível problema	Provável causa	Solução
1	Abrir válvula GLP	Vazamento nas uniões	Junta não foi bem vedada ou falta de aperto nas uniões de GLP	Marcar os pontos de vazamentos; fechar GLP; consertar vazamentos; ligar o exaustor até o GLP desaparecer; voltar no roteiro 1
2	Abrir válvula de alívio do ar			
3	Ligar compressor	Não liga	Fusível queimado ou fio de energia muito fino e a chave desliga	Fechar GLP; verificar problema no compressor; consertar compressor; voltar ao roteiro 1
4	Ajustar os rotâmetros de GLP para acender pré-aquecedor			
5	Ajustar vazão de ar para acender pré-aquecedor			
6	Energizar programador de combustível	Lâmpadas do programador não ligam	Lâmpadas queimadas ou fios de energia soltos ou sujos	Desenergizar programador de combustível; verificar se as lâmpadas não estejam queimadas; verificar conexões do programador e limpar circuito; voltar ao roteiro 6

Tabela E.1: Roteiro básico de operação do gaseificador - Roteiro 7

(Continuação)

Roteiro	Procedimento	Possível problema	Provável causa	Solução
7	Fazer ignição do pré-aquecedor	Não houve ignição da chama	Vela ignição suja e não produz faíscas	Deixar passar ar pelo reator para retirar GLP não queimado; desenergizar programas de combustão; retirar vela de ignição; lixar e limpar vela de ignição; colocar de volta no pré-aquecedor; voltar ao roteiro 6
		Houve ignição mas a chama apagou imediatamente	Sensor óptico sujo ou quebrado	Deixar passar ar pelo reator para retirar GLP não queimado; desenergizar programador de combustão; retirar sensor óptico; limpar o sensor e colocá-lo novamente; voltar ao roteiro 6
		Houve ignição mas o aquecedor desligou após alguns segundos	Mistura de ar e GLP estão na relação errada	Deixar passar ar pelo reator para retirar GLP não queimado; reajustar as vazões de ar e GLP; voltar para o roteiro 7
		Pré-aquecedor acendeu e houve vazamento de gás nas juntas do reator	Falta de aperto nos parafusos das juntas	Desenergizar programador de combustão; deixar passar ar pelo reator para retirar o GLP não queimado; ligar o exaustor até a fumaça acabar; apertar juntas; voltar ao roteiro 7
		Continua o vazamento nas juntas do reator	Vedação velha ou queimada	Desenergizar programador de combustão; deixar passar ar pelo reator para retirar o GLP não queimado; ligar o exaustor até a fumaça acabar; desligar todos os sistemas; fechar válvulos de GLP; refazer as vedações das juntas; voltar ao roteiro 1

Tabela E.1: Roteiro básico de operação do gaseificador - Roteiro 8

(Continuação)

Roteiro	Procedimento	Possível problema	Provável causa	Solução
8	Aumentar a vazão de GLP e ar numa vazão maior para incrementar a taxa de aquecimento	Chama desliga ao modificar vazões	A proporção entre GLP e ar não é correta	Verificar a proporcionalidade entre GLP e ar; deixar passar ar pelo reator para retirar GLP não queimado; voltar ao roteiro 4
		Continua apagando quando se modificam as vazões de ar e GLP	Sensor óptico sujo	Deixar passar ar pelo reator para retirar GLP não queimado; desenergizar programador de combustão; retirar sensor óptico; limpar sensor e voltar a colocá-lo; voltar ao roteiro 4
		Chama apagou antes de atingir a temperatura desejada	Sensor óptico quebrou ou sujou	Deixar passar ar pelo reator para retirar GLP não queimado; desenergizar programador de combustão; retirar sensor óptico; verificar que não esteja quebrado, limpar e colocá-lo de voltar; caso esteja quebrado, trocar por um de reposição; voltar ao roteiro 4
		Vazamento de gás nas juntas do reator	Falta de aperto nos parafusos das juntas	Desenergizar programador de combustão; deixar passar ar pelo reator para retirar GLP não queimado; ligar o exaustor até a fumaça acabar; apertar juntas; voltar ao roteiro 4
		Continua o vazamento nas juntas	Vedação velha	Desenergizar programador de combustão; deixar passar ar pelo reator para retirar GLP não queimado; ligar o exaustor até a fumaça acabar; desligar todos os sistemas e refazer as vedações das juntas; voltar ao passo 1

Tabela E.1: Roteiro básico de operação do gaseificador - Roteiro 9-10

(Continuação)

Roteiro	Procedimento	Possível problema	Provável causa	Solução
9	Ligar exaustor			
10	Esperar temperatura desejada e começar a alimentação de combustível com o fator de ar desejado	<p>Temperatura do leito não chega a temperatura desejada</p> <p>Temperatura do leito não chega a temperatura desejada ainda</p> <p>Vazamento de gás nas juntas do reator</p> <p>Continua o vazamento nas juntas do reator</p>	<p>Calor fornecido pelo combustor não é suficiente</p> <p>Calor fornecido pelo combustor não é suficiente ainda</p> <p>Falta de aperto nos parafusos das juntas</p> <p>Vedação velha</p>	<p>Aumentar vazão de GLP e ar; voltar ao roteiro 10</p> <p>Começar a alimentação de combustível em taxa de combustão com o fator de ar entre 0,8 e 1,0; desligar pré-aquecedor/programador de combustão; esperar até atingir a temperatura desejada para gaseificação; voltar ao roteiro 10</p> <p>Desenergizar programador de combustão; deixar passar ar pelo reator para retirar o GLP não queimado; apertar juntas; voltar ao roteiro 4</p> <p>Desenergizar programador de combustão; deixar passar ar pelo reator para retirar o GLP não queimado; desligar todos os sistemas e refazer as vedações das juntas; voltar ao passo 1</p>

Tabela E.1: Roteiro básico de operação do gaseificador - Roteiro 11-12

(Continuação)

Roteiro	Procedimento	Possível problema	Provável causa	Solução
11	Esperar a temperatura ficar constante e começar retirar amostras de gás para o cromatógrafo	A temperatura sobe e logo o leito começa a esfriar	O material não entra uniformemente	Alimentação inconstante; movimentar material do silo; voltar ao roteiro 11
		Vazamento de gás nas juntas do reator	Falta de aperto nos parafusos das juntas	Desenergizar programador de combustão; deixar passar ar pelo reator para retirar GLP não queimado; apertar juntas; voltar ao roteiro 4
12	Ao terminar o ensaio, interromper a alimentação e queimar a cinza e combustível do leito continuando o fornecimento de ar	A temperatura sobe mais de que $950\text{ }^{\circ}\text{C}$	Muito carbono sem queimar no leito	Diminuir o ar de fluidização e esperar a temperatura abaixar; voltar ao roteiro 11
			A temperatura continua subindo acima de $950\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ainda tem carbono não queimado no reator)	Retirar fornecimento de ar; ir para o roteiro 13

Tabela E.1: Roteiro básico de operação do gaseificador - Roteiro 13-15

(Conclusão)

Roteiro	Procedimento	Possível problema	Provável causa	Solução
13	Deixar o reator esfriar por 10 horas			
14	Abrir o silo utilizando máscara de proteção para monóxido de carbono	Sai fumaça do silo	O material está quente e pirolisando	Tampar o silo imediatamente e ligar o exaustor; voltar ao roteiro 13
15	Limpar o reator e silo (se necessário a tubulação de gás de saída)			

## APÊNDICE F Gráficos de temperatura

Neste apêndice estão os gráficos das temperaturas, a partir do software Fieldlogger, para os ensaios de gaseificação convencional e com reforma a plasma separados por ensaios e por regimes de operação.

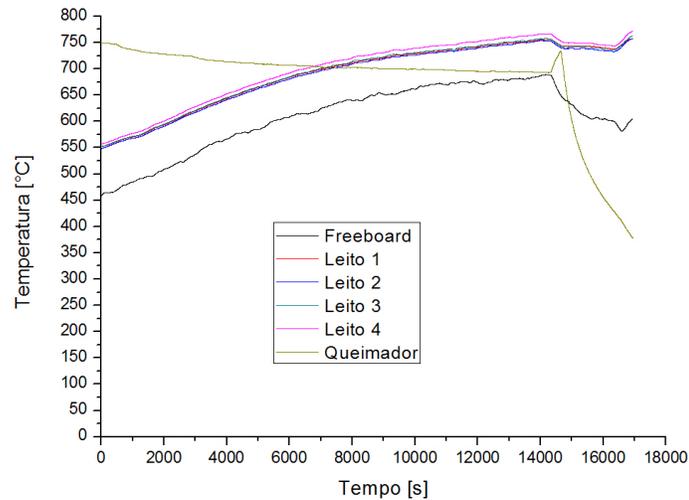


Figura F.1: Ensaio 1 - Curva de aquecimento e gaseificação convencional completa.

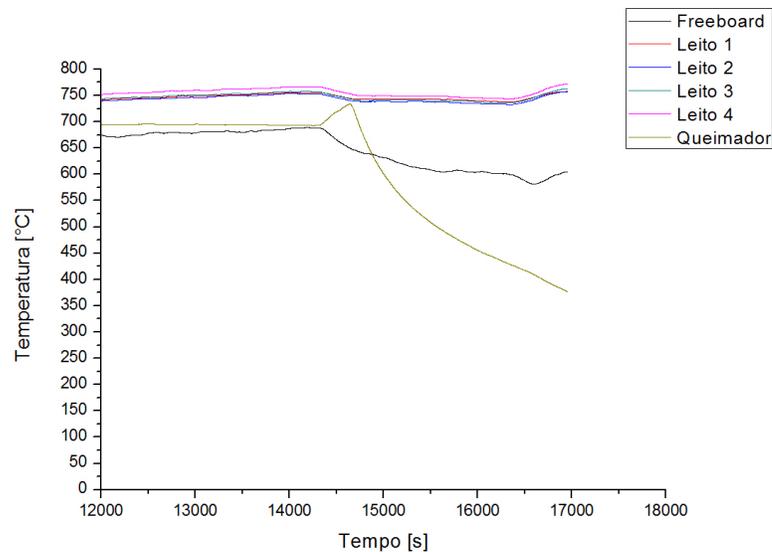


Figura F.2: Ensaio 1 - Regime de gaseificação convencional

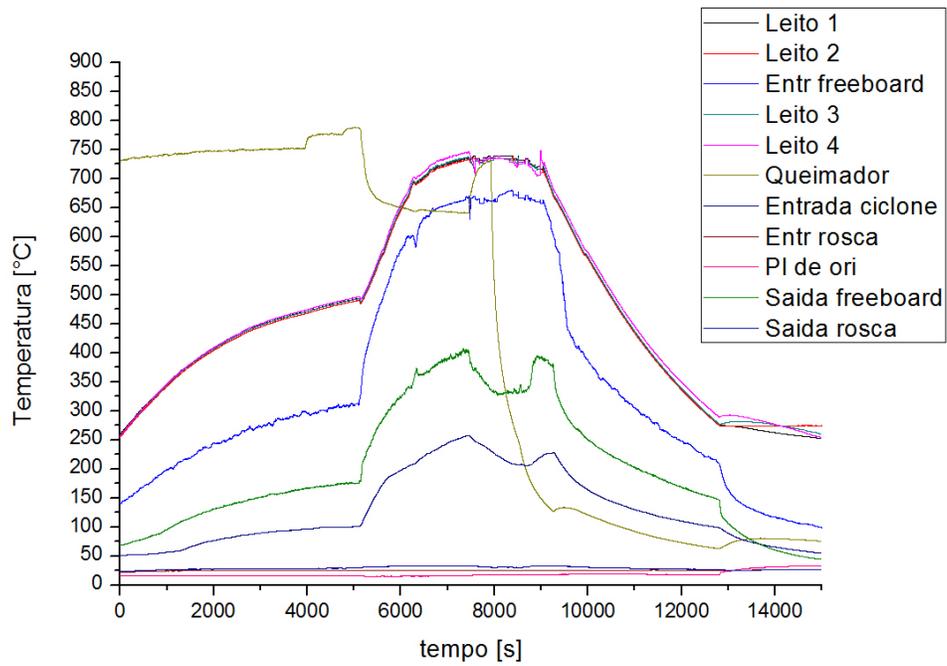


Figura F.3: Ensaio 2 - Curva de aquecimento e gaseificação convencional completa.

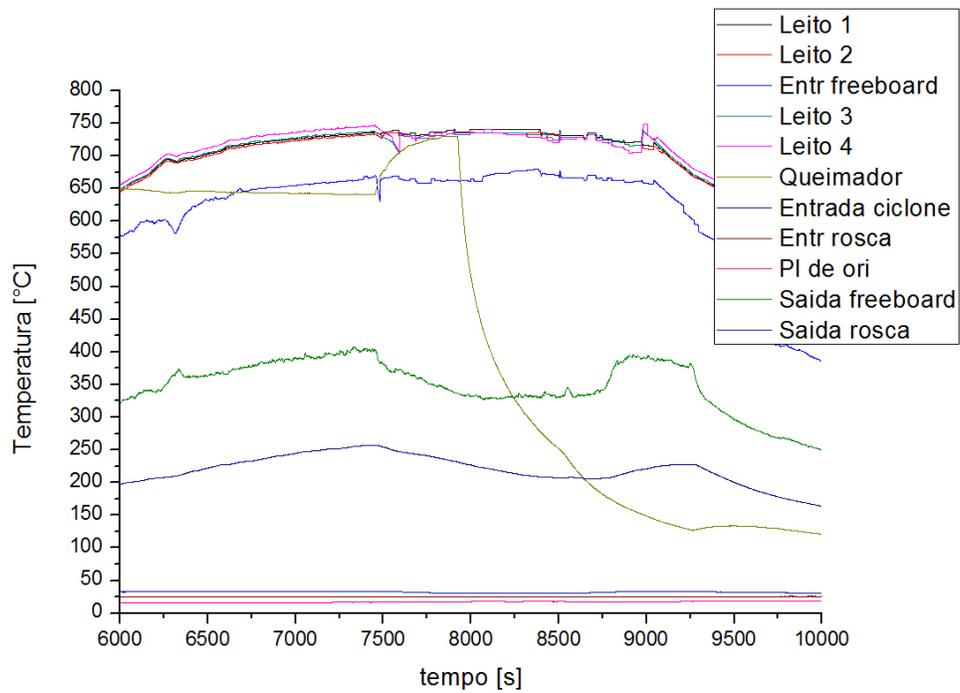


Figura F.4: Ensaio 2 - Regime de gaseificação convencional.

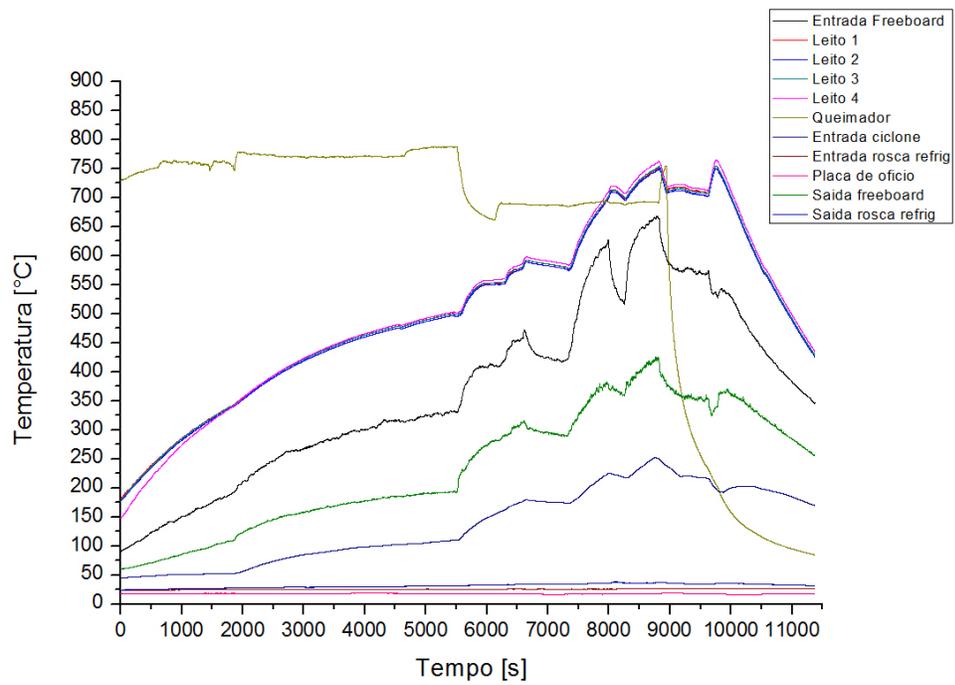


Figura F.5: Ensaio 3 - Curva de aquecimento e gaseificação convencional completa.

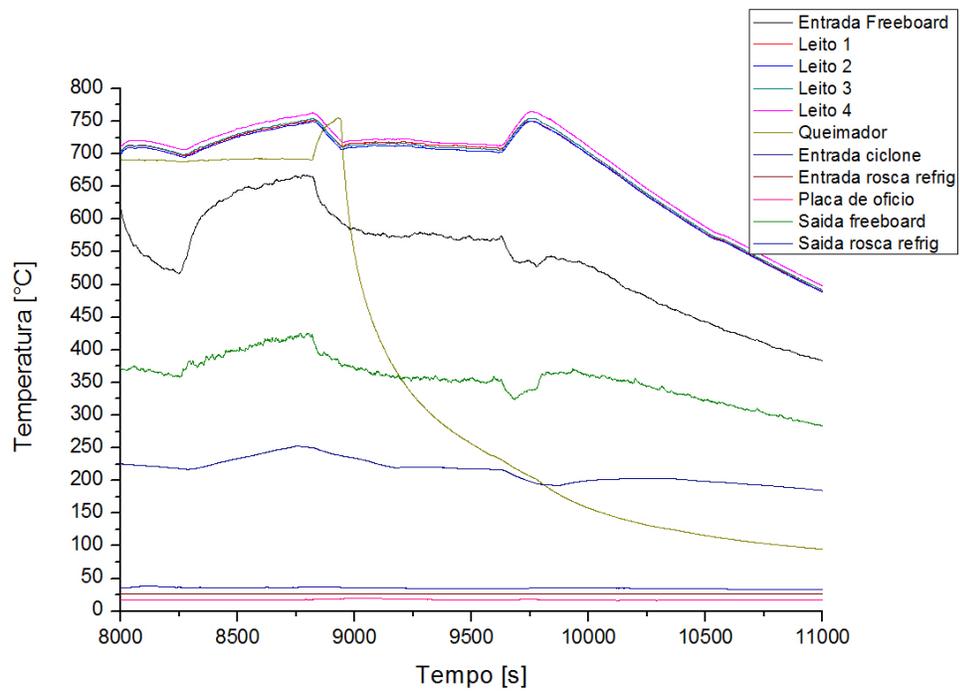


Figura F.6: Ensaio 3 - Regime de gaseificação convencional.

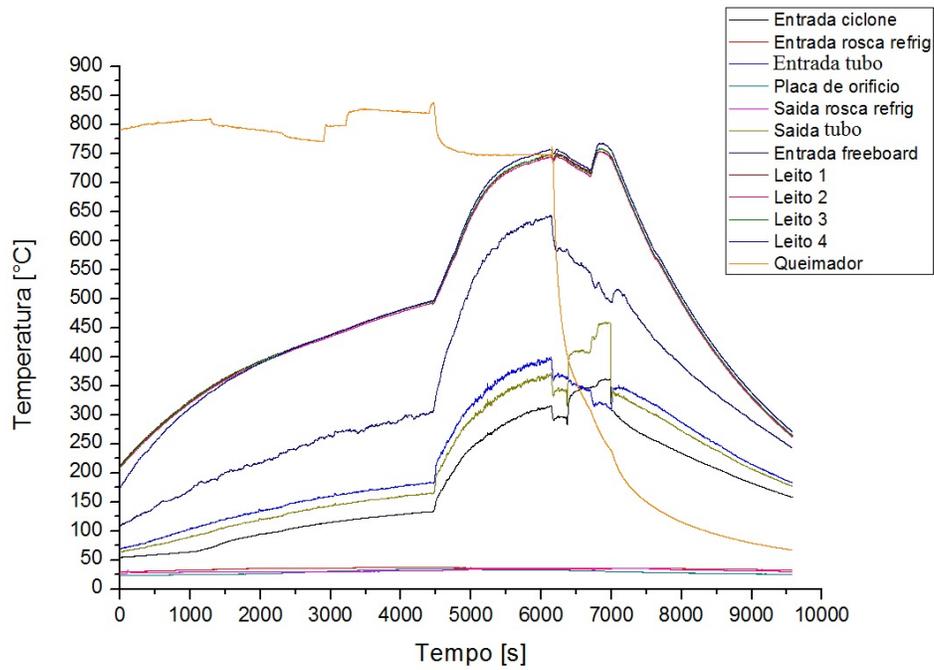


Figura F.7: Ensaio 1 - Curva de aquecimento e gaseificação com reforma de gás a plasma completa.

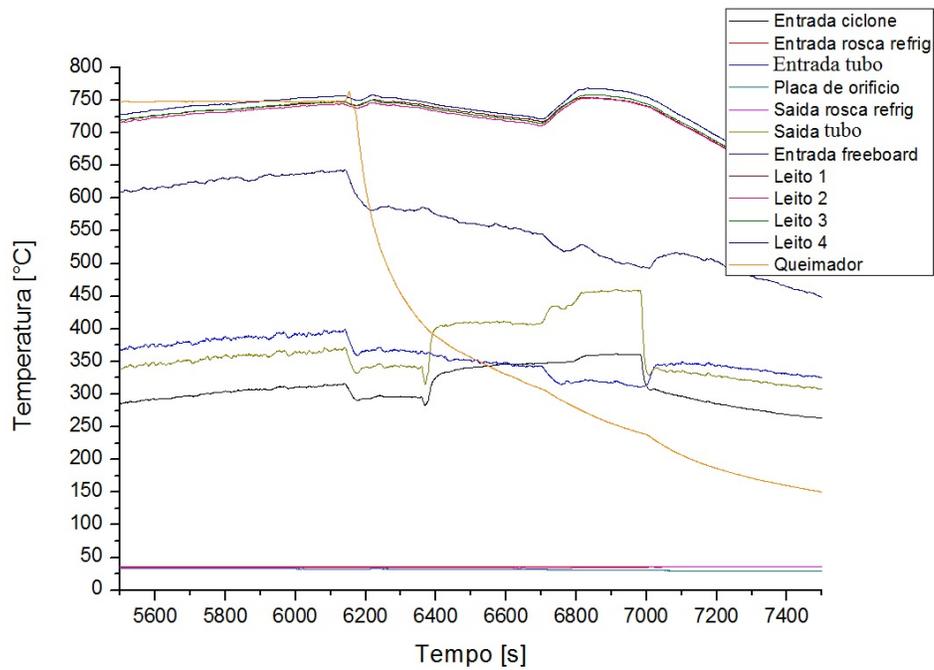


Figura F.8: Ensaio 1 - Regime de gaseificação com reforma de gás a plasma.

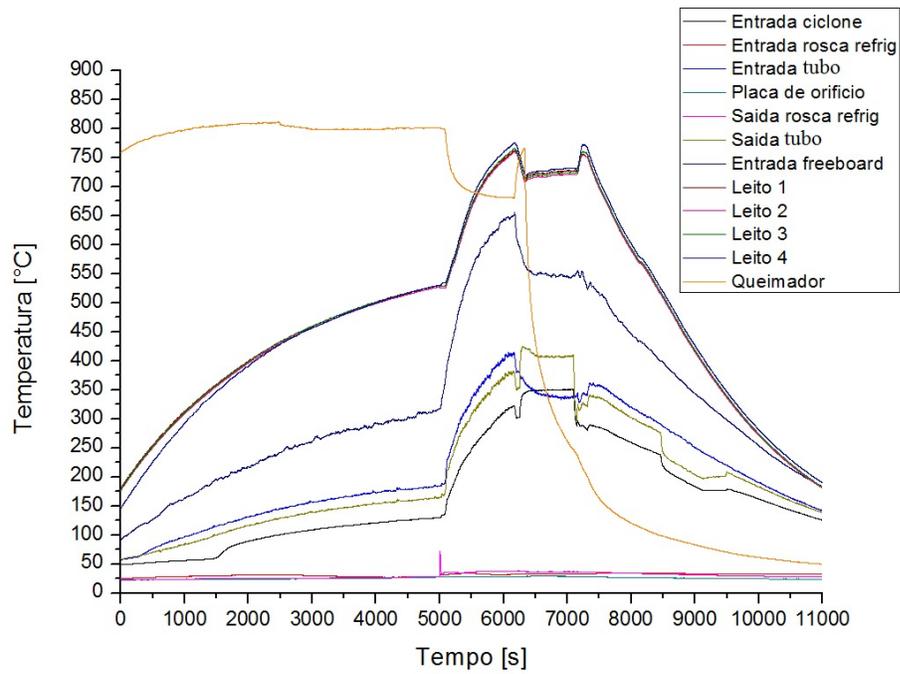


Figura F.9: Ensaio 2 - Curva de aquecimento e gaseificação com reforma de gás a plasma completa.

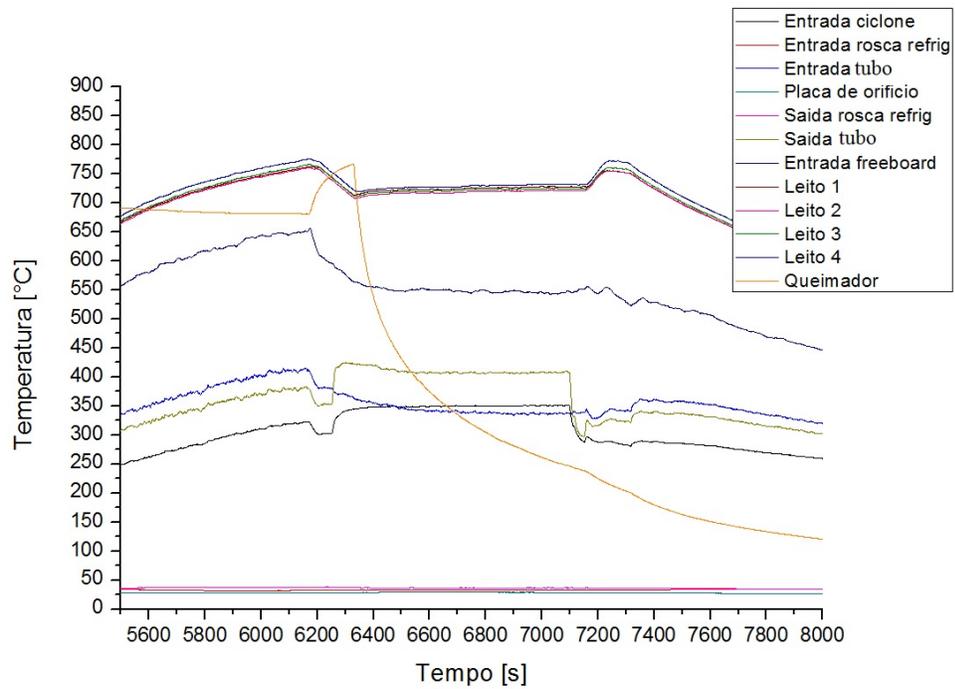


Figura F.10: Ensaio 2 - Regime de gaseificação com reforma de gás a plasma.

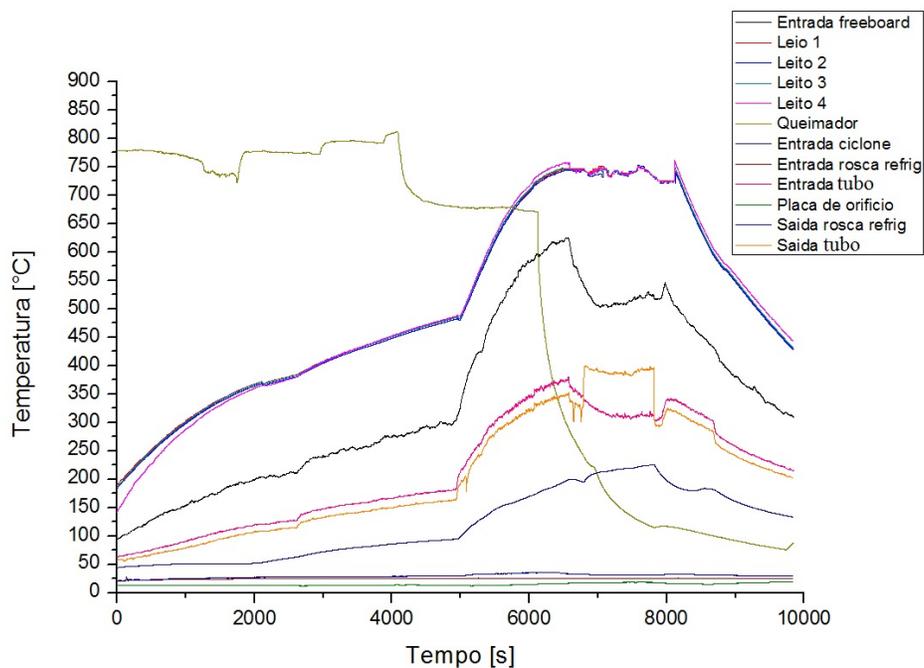


Figura F.11: Ensaio 3 - Curva de aquecimento e gaseificação com reforma de gás a plasma completa.

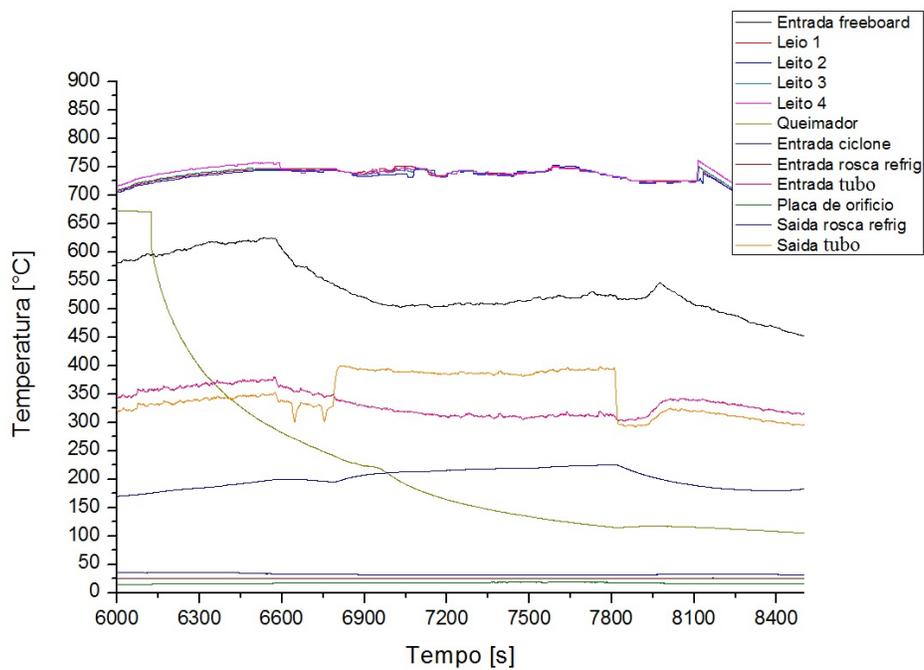


Figura F.12: Ensaio 3 - Regime de gaseificação com reforma de gás a plasma.