RAMIRES MENEZES DA SILVA ARAÚJO

**ESTUDO COMPARATIVO DE PROCESSOS DE GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL**

**São Paulo
2016**

RAMIRES MENEZES DA SILVA ARAÚJO

**ESTUDO COMPARATIVO DE PROCESSOS DE GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS
SÓLIDOS URBANOS NO BRASIL**

**Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de
São Paulo para obtenção do título
de Mestre em Ciências**

**Área de Concentração:
Engenharia Química**

**Orientador:
Prof. Dr. José Luis de Paiva**

**São Paulo
2016**

Este exemplar foi revisado e corrigido em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, _____ de _____ de _____

Assinatura do autor: _____

Assinatura do orientador: _____

Catálogo-na-publicação

Araújo, Ramires Menezes da Silva

Estudo comparativo de processos de gaseificação para resíduos sólidos urbanos / R. M. S. Araújo -- versão corr. -- São Paulo, 2016.

62 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1.Gseificação 2.Resíduos 3.Energia I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II.t.

*“Não temas, porque eu sou contigo;
Não te assombres, porque eu sou teu Deus,
Eu te fortaleço, e te ajudo, e te sustento com a destra da minha justiça”*

Isaías 41.10

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo seu amor e cuidado que me sustentaram até aqui.

A minha família e amigos pela compreensão e encorajamento de sempre.

Ao meu amado Emanuel Bressan Mühlbeier pelo amor, companheirismo e apoio constante.

Ao Professor Dr. José Luis de Paiva pela disposição, apoio, dedicação e orientação valiosa para a realização deste trabalho.

Ao Professor Dr. Newton Libânio Ferreira pela amizade, apoio e colaboração ao longo da minha trajetória acadêmica e por suas sugestões essenciais para o desenvolvimento desse estudo.

Aos professores do Departamento de Engenharia Química pela dedicação e colaboração em cada etapa do curso.

Ao Departamento de Engenharia Química da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo pela oportunidade de realizar o curso de Mestrado.

RESUMO

Os resíduos sólidos urbanos (RSU) no Brasil são na grande maioria direcionados para aterros e lixões a céu aberto, onde ocupam grandes áreas, geram transtornos relacionados ao tráfego aéreo, emitem gases responsáveis pelo efeito estufa sem o devido reaproveitamento energético.

Como alternativa para a minimização do passivo ambiental causado pelos RSUs e potencial reaproveitamento energético propõe-se um estudo comparativo de processos de gaseificação desses resíduos em diferentes meios gaseificantes.

A modelagem e simulação dos processos foram feitas aplicando-se o método de minimização da energia livre de Gibbs não estequiométrica.

Considerou-se a quantidade de resíduo sólido urbano destinado da sub-região de Campo Limpo – São Paulo - e a sua composição representativa expressa pelo método *ultimate-analysis*. O processo de gaseificação foi implementado em simulador de processo e o estudo se concentrou nas etapas do processo de gaseificação, investigando-se a ação dos seguintes meios gaseificantes: ar, vapor e mistura ar e vapor.

Os principais resultados analisados foram a composição do produto da gaseificação e o potencial energético do produto.

Palavras-chave: Gaseificação, Resíduos Sólidos Urbanos, Reaproveitamento Energético.

ABSTRACT

The major destiny of Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil is landfill. These sites occupy large areas; most of them are open, being simply disposal areas. This situation causes several problems ranging from greenhouse gases to air traffic jeopardizing.

The use of MSW in energy generation addresses these problems, once it is one of most promising solutions to MSW treatment.

This work is the study of gasification from the energy potential. It was carried out through minimization of Gibbs energy in a process simulator.

The MSW considered was the one from area of Campo Limpo in São Paulo city. Its composition was expressed by ultimate analysis.

The use of different gasification agents included air, steam and their mixtures was analyzed. The results were HHV and composition of generated gases.

Keywords: Gasification, Municipal Solid Waste, waste-to-energy.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Croqui ilustrativo de disposição em Lixão	4
Figura 2.2 - Croqui de disposição de Aterro Controlado	5
Figura 2.3 - Croqui ilustrativo de Aterro Sanitário	6
Figura 2.4 - Diagrama ternário dos produtos de gaseificação de biomassa.....	20
Figura 3.1 - Temperatura da reação adiabática entre biomassa e oxigênio.....	29
Figura 3.2 - Composição de equilíbrio do gás para reação com ar.....	29
Figura 3.3 - Esquema do modelo do processo de gaseificação em meio ar.....	34
Figura 3.4 - Esquema do modelo do processo de gaseificação em meio vapor.....	35
Figura 3.5 - Esquema do modelo do processo de gaseificação em meio ar e vapor.	36
Figura 6.1 - População recenseada, taxas de Crescimento Populacional e Densidade Demográfica Município de São Paulo, Subprefeituras e Distritos Municipais	47
Figura 6.2 - Legenda de abreviações do modelo	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Diretrizes e estratégias do Plano Nacional de Resíduos Sólidos para a eliminação dos lixões.	7
Tabela 2.2 - Diretrizes e estratégias do Plano Nacional de Resíduos Sólidos de incentivo a novas alternativas de disposição dos resíduos.	8
Tabela 2.3 - Resumo do potencial energético de fontes de biomassa existentes nos EUA.	9
Tabela 2.4 - Gerenciamento de Resíduos Sólidos Municipais 1960 a 2005, em milhões de toneladas.....	10
Tabela 2.5 - Principais características dos processos químicos para tratamento térmico de resíduos sólidos, adaptado de Arena e Mastellone (2009). ..	11
Tabela 2.6 - Composição gravimétrica dos RSUs coletados no Brasil (base seca), 2008.....	12
Tabela 2.7 - Estimativa da composição gravimétrica dos RSUs coletados no Brasil (base seca), 2012	12
Tabela 2.8 - Estimativa da composição gravimétrica dos RSUs coletados nos Estados Unidos (base seca)	14
Tabela 2.9 - Estimativa da composição gravimétrica dos RSUs coletados nos Estados Unidos (base seca)	14
Tabela 2.10 - Reações Típicas do processo de Gaseificação.....	19
Tabela 3.1 - Proximate e Ultimate Analysis e HHV para os macrocomponentes dos RSUs (base seca)	24
Tabela 3.2 - Dados de entrada para a simulação dos modelos.	26
Tabela 3.3 - Parâmetros dos casos de estudo.	27
Tabela 4.1 - <i>Proximate e Ultimate Analysis</i> e <i>HHV</i> para a composição gravimétrica RSUs-Brasil.....	37
Tabela 4.2 - Características dos RSUs produzidos na região metropolitana de Belo Horizonte	38
Tabela 4.3 - Vazões molares das correntes de saída dos processos de gaseificação.	40
Tabela 4.4 - Composições das correntes de saída dos processos de gaseificação..	41
Tabela 4.5 - Composições das correntes de saída das fornalha das caldeiras.....	42
Tabela 4.6 - Correntes de vapor geradas nos processos acoplados à gaseificação.	43

Tabela 4.7 - Trabalho consumido/gerado pelos processos de geração de vapor.....44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ASTM	American Society for Testing Materials
EPA	U.S. Environmental Protection Agency
HHV	<i>Higher Heating Value</i>
IES	Instituições de Ensino Superior
OGU	Orçamento Geral da União
PGIRS	Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SINIR	Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão dos Resíduos Sólidos
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
WtE	<i>Waste – to – Energy</i>
IM	Identificação no modelo

LISTA DE SÍMBOLOS

a_{ij}	Parâmetro da equação (16): número de átomos do elemento j na molécula i.
b_j	Parâmetro da equação (15): número total de átomos do elemento j presente no sistema a molécula i.
CF	Carbono Fixo
ER	<i>Equivalence ratio</i>
f_i^o	Fugacidade nas condições padrão da substância i
f_i	Fugacidade substância i
G	Energia livre de Gibbs
G_i^o	Energia livre de Gibbs padrão da substância i
M	<i>Moisture</i>
MV	Material Volátil
n_i	número de moles de i
P	Pressão
R	Constante universal dos gases
SB	<i>Steam-to-biomass ratio</i>
T	Temperatura
y_j	Fração molar do componente i

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVO	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS: CARACTERÍSTICAS E POLÍTICA DE DESTINAÇÃO NO BRASIL	4
2.2 GASEIFICAÇÃO	15
2.3 MODELOS DE GASEIFICAÇÃO.....	20
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	23
3.1 ESPECIFICAÇÃO DA COMPOSIÇÃO ELEMENTAR DOS RESÍDUOS	23
3.2 DEFINIÇÃO DOS CASOS DE ESTUDO E CONDIÇÕES DE PROCESSO PARA A SIMULAÇÃO ..	25
3.3 DESENVOLVIMENTO DOS MODELOS DE SIMULAÇÃO	30
3.3.1 Simulador de Processos	30
3.3.2 Hipóteses Adotadas.....	31
3.3.3 Descrição do modelo de gaseificação e geração de energia (cogeração).....	31
3.3.3.1 Ultimate Analysis	32
3.3.3.2 Pirólise	32
3.3.3.3 Combustão Parcial	32
3.3.3.4 Gaseificação	32
3.3.3.5 Gerador de Energia	33
4. RESULTADOS	37
4.1 ANÁLISE DA COMPOSIÇÃO DO PRODUTO DO PROCESSO DE GASEIFICAÇÃO	38
4.2 ANÁLISE DO PROCESSO DE GERAÇÃO DE ENERGIA.....	41
5. CONCLUSÃO.....	45
6. ANEXOS.....	47
7. REFERÊNCIAS	49

1. INTRODUÇÃO

Historicamente a assinatura de tratados e acordos de minimização de emissão de poluentes foram marcos para a mudança de cultura da indústria. No entanto, ainda é necessária a adoção de novas estratégias para garantir o progresso sustentável. É nesse contexto que se destaca a análise da destinação dos Resíduos Sólidos Urbanos ou RSUs, uma vez que esse material está presente em todo o mundo e, portanto, potencial passivo ambiental.

A definição de RSU, apresentada a seguir, oriunda do Plano Nacional de Resíduos Sólidos expõe esse potencial e também a necessidade de técnicas economicamente viáveis para tratar esse material (AMBIENTE, 2012):

“Resíduos Sólidos Urbanos: material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou exijam para isso soluções técnicas ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.”.

O aumento da população mundial tem como consequência o aumento de geração de resíduos, bem como na demanda por energia, e dentro dinâmica cresce o interesse pela exploração do potencial energético dos RSUs.

No Brasil, mais de 90% (em massa) dos resíduos sólidos urbanos são destinados para a disposição final em aterros sanitários, aterros controlados e lixões, sendo os 10% restantes distribuídos entre unidades de compostagem, unidades de triagem e reciclagem, unidades de incineração, vazadouros em áreas alagadas e outros destinos. (AMBIENTE, 2012).

Muitas tecnologias de reaproveitamento energético são exploradas em outros países, tais como Japão e Canadá, que se destacam pelos estudos referentes à aplicação do processo de gaseificação para esse fim. Atualmente a gaseificação é considerada como uma das mais promissoras alternativas para a destinação dos RSUs. Trata-se de um processo de conversão de matéria orgânica em espécies gasosas de alto valor

agregado, em termos energéticos, realizada em alta temperatura e com quantidade controlada de oxigênio. (LIA et al., 2003) (MATERAZZI et al., 2013)

O estudo apresentado nesse trabalho é estruturado a partir da análise de dados da literatura referente ao tema, com ênfase na modelagem do processo através da aplicação da técnica de equilíbrio termodinâmico não estequiométrico pela minimização da energia livre de Gibbs. Técnica fortemente indicada para processos, cuja corrente de alimentação do processo não possui composição bem definida e as características físicas dos equipamentos não são bem conhecidas. O processo de cálculo não considera a dependência de informação referente ao mecanismo e cinética das reações, mas sim a função de estado energia livre de Gibbs (G), através do qual é possível determinar se o processo proposto é termodinamicamente possível ou não. A minimização dessa função é o objetivo da convergência do modelo, garantindo-se o equilíbrio termodinâmico e assim determinando a máxima produção possível para condição estudada.

O processo de gaseificação pode ser basicamente dividido em quatro etapas: secagem, pirólise, combustão parcial e gaseificação ou reforma. (BASU, 2013)

Como escopo do presente estudo considerou-se a quantidade de resíduo sólido urbano destinado da sub-região de Campo Limpo – São Paulo, 328,5t/dia e a sua composição representativa expressa pelo método *ultimate-analysis*. O processo de gaseificação foi implementado em simulador de processo e o estudo se concentrou nas etapas do processo de gaseificação, investigando-se os seguintes meios gaseificantes: ar, vapor e mistura ar e vapor. Os principais resultados analisados foram a composição do produto da gaseificação e respectivo o potencial energético do produto final. A rota com maior potencial de geração de hidrogênio é a que emprega o vapor como agente gaseificante e a de maior aproveitamento energético na forma de trabalho na turbina é favorecido pela rota empregando-se ar, que garante a geração de 3,6 MW, equivalente ao abastecimento de 5% das famílias da sub-região do Campo Limpo.

1.1 Objetivo

O objetivo da presente dissertação é o estudo comparativo do potencial energético do processo de gaseificação de resíduos sólidos urbanos (RSU) típicos do Brasil com diferentes meios gaseificantes, a saber: ar, vapor e mistura ar e vapor.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Resíduos sólidos: características e política de destinação no Brasil

No Brasil as técnicas de destinação final dos RSUs mais utilizadas são os Lixões, Aterros Controlados e Aterros Sanitários, 90% de todo os resíduos com destinação rastreada são distribuídas entre as três técnicas.

Lixões ou Vazadouros a céu aberto: caracterizam-se pelo simples lançamento sobre o solo a céu aberto, sem medidas de proteção ao meio ambiente e à saúde pública. Medida que oferece instabilidade do maciço de lixo, uma vez que não há critério técnico para o lançamento. Não menos importantes são os incêndios gerados pela disposição inadequada dos resíduos, a condição insalubre das pessoas que trabalham nesse ambiente, bem como o risco oferecido ao tráfego aéreo devido a grande presença de aves como urubus, nas circunvizinhanças dos lixões. (VERDEGHAIA,2014)

Figura 2.1 - Croqui ilustrativo de disposição em Lixão

Fonte: <http://bibocablogspot.com.br>

Aterro Controlado: Técnica de disposição utilizada para confinar o lixo urbano, difere do lixão pela rotina de adição de cobertura ou camada de solo material inerte final de cada jornada de trabalho, o que diminui, mas não elimina a presença de animais. Em alguns casos há a captação e queima de gases oriundos do processo de

decomposição dos resíduos, mas assim como os lixões não há um sistema de impermeabilização que impeça a contaminação do solo pelo chorume que também é produto da decomposição.

Figura 2.2 - Croqui de disposição de Aterro Controlado

Fonte: bibocaambiental.blogspot.com.br

Aterro Sanitário: Técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais. Nesta técnica, utilizam-se procedimentos de engenharia (impermeabilização do solo, cercamento, ausência de catadores, sistema de drenagem de gases, águas pluviais e lixiviado) para confinar os resíduos e rejeitos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-o com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se necessário (adaptado da NBR 8419:1992).

Figura 2.3 - Croqui ilustrativo de Aterro Sanitário

Fonte: <http://bibocablogspot.com.br>

As duas primeiras formas de disposição são amplamente questionadas do ponto de vista ambiental, uma vez que geralmente não estão acopladas a qualquer captação de chorume e/ou gases provenientes dos resíduos. A contaminação devido à infiltração de chorume no solo pode se estender a lençóis freáticos, tornando as áreas utilizadas para disposição dos resíduos potenciais consumidoras de remediação de solo e água.

A política atual apresentada no Plano Nacional de Resíduos Sólidos traz como diretriz, embasada na lei 12.305/2010 disposto no § 1º do art. 9º, a eliminação dos lixões e aterros controlados a ser implantada no prazo de até quatro anos da data da publicação da mesma. A Diretriz 1 e as respectivas estratégias são apresentadas na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Diretrizes e estratégias do Plano Nacional de Resíduos Sólidos para a eliminação dos lixões.

Diretriz 1	
Eliminar os lixões e aterros controlados e promover a Disposição Final Ambientalmente Adequada de Rejeitos, conforme estabelecido na lei 12.305/2010 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos e seu decreto regulamentador – Decreto no. 7.404/2010.	
Estratégia 1	Aportar recursos visando contribuir para o encerramento (O encerramento de lixões e aterros controlados compreende no mínimo: ações de cercamento da área; drenagem pluvial; cobertura com solo e cobertura vegetal; sistema de vigilância; realocação das pessoas e edificações que porventura se localizem dentro da área do lixão e aterro controlado. O remanejamento deve ser de forma participativa, utilizando como referência o programa pró-catador (Decreto 7.405/10) e os programas de habitação de interesse social) dos lixões e aterros controlados em todos os municípios do território nacional.
Estratégia 2	Aportar recursos visando à elaboração de projetos (básico e executivo) e a implantação de unidades de disposição final de rejeitos (aterros sanitários), atendendo os critérios de prioridade da política nacional de resíduos sólidos e dos seus programas. Salvo quando se referir à elaboração de planos estaduais ou de PGIRS intermunicipal ou municipal, o apoio com recursos do OGU exigirá a prévia edição de plano estadual (no caso de apoio a Estados) ou de PGIRS (no caso de apoio a Municípios ou agrupamento de Municípios).
Estratégia 3	Aportar recursos destinados à capacitação técnica de gestores das três esferas de governo, de forma continuada, e assistência técnica, principalmente no que se refere a elaboração de projetos de engenharia, processo licitatório, acompanhamento da execução das obras e gestão técnica, orçamentária e financeira dos empreendimentos construídos.
Estratégia 4	Aportar recursos voltados para o desenvolvimento institucional, principalmente no que se refere à elaboração de planos de resíduos sólidos por parte dos demais entes federados e consórcios públicos, e implementação de sistemas de informação integrados ao SINIR e no fortalecimento dos Consórcios Públicos constituídos.
Estratégia 5	Fomentar, junto aos órgãos integrantes do SISNAMA, a informatização de dados e a padronização de procedimentos que permitam maior transparência e agilidade, quando couber, nos processos de licenciamento ambiental.
Estratégia 6	Aportar recursos, com dignidade e remuneração do trabalho, dos catadores, em especial os oriundos de lixões e aterros controlados, dotando-os de infraestrutura, capacitação e assistência técnica.
Estratégia 7	Definir normas técnicas para encerramento de lixões e aterros controlados

Fonte: Adaptado de Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012.

Além da abordagem de eliminação da disposição em lixões o PNRS apresenta por meio da Diretriz 4, Tabela 2.2, a tendência de busca de novas estratégias de disposição mais limpas e adequadas do ponto de vista socioambiental.

Tabela 2.2 - Diretrizes e estratégias do Plano Nacional de Resíduos Sólidos de incentivo a novas alternativas de disposição dos resíduos.

Diretriz 4	Desenvolver tecnologias para reduzir a disposição final em aterros sanitários.
Estratégia 1	Fomentar Pesquisa & Desenvolvimento, Inovação com envolvimento de Instituições de Ensino Superior (IES).
Estratégia 2	Promover mecanismos de intercâmbio e disseminação de conhecimentos e tecnologias, voltados para o aprimoramento da formação profissional dos agentes envolvidos.
Estratégia 3	Criar instrumentos fiscais e orçamentários a fim de constituir os recursos necessários para implementação de programas e chamadas de pesquisas em âmbito, nacional, regional e local.

Fonte: Adaptado de Plano Nacional de Resíduos Sólidos, 2012.

No contexto da Estratégia 1 da Diretriz 4 o estudo de novas alternativas para a disposição de resíduos ganha destaque. Em países da União Europeia onde as políticas ambientais apresentam maior nível de maturidade, muitos estudos voltados para o tema já foram publicados e até mesmo em países que não são considerados pioneiros na questão ambiental como os Estados Unidos da América é possível observar a tendência de crescimento de políticas onde há recuperação de energia.

Na Tabela 2.3, que apresenta o potencial energético disponível em fontes de Biomassa nos Estados Unidos é possível observar a relevância energética dos RSUs.

Tabela 2.3 - Resumo do potencial energético de fontes de biomassa existentes nos EUA.

Fonte	10 ⁶ Tons/Ano	
	(Base Seca)	Quads/Ano
Resíduos de colheita	278	4,15
Adubo Animal	26,5	0,33
Resíduos Industriais	24,1	0,41
Resíduos Agrícolas	83,2	1,41
Resíduos Sólidos Urbanos	130	1,63
Florestas	384	6,51
Total	925,8	14,44

Quads: 13,23 x 10⁶ kJ

Fonte: Adaptado de (REED e DAS, 1988)

Na Tabela 2.4 é apresentado o histórico da disposição de RSU nos Estados Unidos no período entre 1960 e 2005. Com os dados referentes ao ano de 2005 para os EUA e 2008 para o Brasil o comparativo evidencia algumas diferenças na política de disposição. Tendo como exemplo de comparação a parcela destinada à combustão com recuperação de energia, que nos EUA representa cerca de 16% da destinação dos RSUs enquanto no Brasil esse número é menor que 10%, uma vez que essa é a fração não destinada a disposição em aterros. Essa pequena parcela é distribuída entre as unidades de compostagem, reciclagem, unidades de incineração e vazadouros em áreas alagadas entre outros. Os dados referentes ao reaproveitamento energético não são disponibilizados no PNRS.

A busca por novas alternativas está diretamente ligada ao aumento da geração de resíduos devido ao aumento da população e a consequente diminuição de áreas disponíveis para disposição em aterros, além de novas políticas ambientais mais arrojadas.

Nos EUA o fenômeno referente a mudanças nas políticas ambientais é evidenciado a partir da análise da parcela destinada à combustão sem recuperação de energia. Esta parcela sofreu um encolhimento devido ao controle de poluentes que passou a vigorar com mais força no período entre 1980 e 1985, período no qual se identifica um pico na disposição em aterros. (TCHOBANOGLIOUS e KREITH, 2002)

Quando a comparação se dá na parcela destinada a reciclagem a diferença é ainda maior, a fração que em 1985 era menor que 7% em 2005 a mesma representa mais de 26% do total de resíduos gerados.

Tabela 2.4 - Gerenciamento de Resíduos Sólidos Municipais 1960 a 2005, em milhões de toneladas.

Materiais	1960	1965	1970	1975	1980	1985	1990	1995	1997	1998	2005***
Geração	88,1	104,4	121,1	127,8	151,6	166,3	205,2	211,4	216,4	220,2	239,5
Recuperação Via - Reciclagem	5,6	6,8	8	9,9	14,5	16,4	29	45,3	47,3	49	61,8
Recuperação Via - Compostagem	0	0	0	0	0	0	4,2	9,6	12,1	13,1	14,9
Total Recuperado	5,6	6,8	8	9,9	14,5	16,4	33,2	54,9	59,4	62,1	76,7
Descarte após Recuperação*	82,5	97,6	113,1	117,9	137,1	149,9	172	156,5	157	158,1	162,8
Combustão com recuperação de Energia	0	0,2	0,4	0,7	2,7	7,6	29,7	35,54	36,7	37	38
Combustão sem Recuperação de Energia	27	26,8	24,7	17,8	11	4,1	2,2	0	0	0	0
Total Combustão	27	27	25,1	18,5	13,7	11,7	31,9	35,54	36,7	37	38
Descarte em Aterros, outros**	55,5	70,6	88	99,4	123,4	138,2	140,1	120,96	120,3	121,1	124,8

*Não inclui resíduos dos processos de reciclagem/compostagem

**Não inclui resíduos dos processos de reciclagem/compostagem/combustão

***Assumido total de 32% de recuperação

Fonte: Adaptado de U.S Environmental Protection Agency – EPA (1999)

As técnicas utilizadas nos Estados Unidos são parte de uma gama de alternativas para a disposição de resíduos. As técnicas baseadas na conversão termoquímica ganharam destaque no cenário de geração de energia através de rejeitos, e entre elas a gaseificação. No Japão desde o início dos anos 90 o interesse pela tecnologia fomentou o crescimento de tratamento de resíduos pela aplicação da técnica de gaseificação. (NOBUHIRO et al., 2011) (ARAFAT e JIJAKLI, 2013) (ZHANG et al., 2013).

Atualmente há algumas plantas de gaseificação de resíduos municipais em operação no país, onde a preocupação relacionada à disponibilidade de áreas para disposição

de resíduos é uma das grandes motivadoras do avanço da tecnologia. (NOBUHIRO et al., 2011)

A Tabela 2.5 ilustra a comparação entre as três principais rotas de termoconversão aplicadas para o conceito *Waste - to - Energy* (WtE), rejeito para geração de energia.

Tabela 2.5 - Principais características dos processos químicos para tratamento térmico de resíduos sólidos, adaptado de Arena e Mastellone (2009).

Condições Operacionais e Ambiente Reacional	Oxidação em condições acima do requerido estequiométricamente para combustão.	Redução de oxidante abaixo do requerido estequiométricamente para combustão	Total abstenção de oxidante.
Gases reagentes	Ar	Ar, oxigênio, oxigênio-ar, vapor	-
Temperaturas	Entre 850°C e 1200 °C	Entre 550- 900°C (gasificação a ar) e 1000-1600°C	Entre 500°C e 800 °C
Pressão	Geralmente Atmosférica	Geralmente Atmosférica	Levemente acima da pressão atmosférica
Produtos	CO ₂ e H ₂ O	CO, H ₂ , CO ₂ , H ₂ O e CH ₄	CO, H ₂ , CH ₄ e hidrocarbonetos
Poluentes	SO ₂ , Nox, HCl, PCDD/F, particulados	H ₂ S, HCl, COS, NH ₃ , HCN, "piche", alcali e particulados	H ₂ S, HCl, NH ₃ , HCN, "piche", alcali e particulados
Resíduos sólidos dos processos	As cinzas podem ser tratadas para a recuperação de metais ferrosos e não ferrosos. O restante é tratado e destinado a aterros industriais	Assim como na combustão as cinzas podem ser recuperadas, geralmente a escória vítrea pode ser utilizada como carga em materiais de construção.	Geralmente apresentam teor de carbono expressivo. São tratadas e dispostas como rejeito industrial especial.
Necessidade de tratamento do produto	Tratamento de controle de poluição do ar e dispersão por chaminés	É possível adequar o produto das reações, de modo a atingir as regulamentações de produção de produtos químicos ou através de dispositivos de alta conversão energética	É possível adequar o produto das reações, de modo a atingir as regulamentações de produção de produtos químicos ou através de dispositivos de alta conversão energética

Fonte: Adaptado de ARENA, 2011

Na Tabela 2.5 fica evidente o potencial econômico da gaseificação, uma vez que a saída do processo são gases combustíveis de alto valor agregado como CH₄, H₂ etc., no entanto além das características já apresentadas a seleção de uma estratégia de disposição voltada para o conceito *WtE*, depende de uma série de fatores como: composição gravimétrica dos resíduos, a quantidade disponível, legislação ambiental, a logística entre outros. Dentre esses fatores a composição gravimétrica e química dos resíduos são dados importantes para a pesquisa e desenvolvimento dessas tecnologias, uma vez que a determinação das possíveis rotas de processo a serem aplicadas está diretamente ligada a esses parâmetros.

No Brasil, segundo Plano Nacional de Resíduos Sólidos, o perfil de composição gravimétrica dos resíduos municipais é ilustrado na Tabela 2.6. Do total apresentado na Tabela 2.6, 179,1 ton/dia são provenientes da região sudeste do país, cerca de 40% de todo o resíduo coletado no país.

Tabela 2.6 - Composição gravimétrica dos RSUs coletados no Brasil (base seca), 2008

Resíduos	Participação (%)	Quantidade (t/dia)
Material Reciclável	31,9	58527,4
Metais	2,9	5293,5
Aço	2,3	4213,7
Alumínio	0,6	1079,9
Papel, papelão e tetrapack	13,1	23997,4
Plástico total	13,5	24847,9
Plástico filme	8,9	16399,6
Plástico Rígido	4,6	8448,3
Vidro	2,4	4366,6
Matéria Orgânica	51,4	94335,1
Outros	16,7	30618,9
Total	100	183481,5

Fonte: Adaptado de PNRS(AMBIENTE, 2012)

A distribuição apresentada apesar de se tratar de um retrato do cenário do ano de 2008, é representativa quando comparada ao perfil de composição para os países da América Latina no ano de 2012 apresentado por LECKNER na Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Estimativa da composição gravimétrica dos RSUs coletados no Brasil (base seca), 2012

Resíduos	Participação (%)
Material Reciclável	34
Metais	2
Papel	16
Plástico total	12
Vidro	4
Matéria Orgânica	54
Outros	12
Total	100

Fonte: Adaptado de LECKNER

Como supracitado a composição é diretamente dependente de fatores geográficos, culturais entre outros, com efeito ilustrativo dessa dependência é apresentado na

Tabela 2.8 o perfil de composição gravimétrica dos resíduos sólidos municipais nos Estados Unidos da América. Comparando os dados das Tabelas 2.6 e 2.8 é possível observar o aumento de quase 50% da parcela de materiais recicláveis e a diminuição de cerca de 60% da parcela referente à matéria orgânica.

Tabela 2.8 - Estimativa da composição gravimétrica dos RSUs coletados nos Estados Unidos (base seca)

Resíduos	Participação (%)	Quantidade (Mt/ano)
Material Reciclável	60,7	
Metais	2,1	
Aço		13,6
Alumínio		3,8
Não Ferrosos		1,3
Papel, papelão e tetrapack	39,6	94,8
Plástico total	11,1	26,7
Borracha e Couro Sintético	3,2	7,7
Texteis	4,3	10,2
Madeira	6,6	15,8
Vidro	4,7	11,2
Outros	1,8	4,3
Matéria Orgânica	19,4	46,5
Matéria Inorgânica	1,5	3,7
Total		239,6

Fonte: Adaptado de (TCHOBANOGLIOUS & KREITH, 2002)

Assim como adotado para a análise de representatividade dos dados de composição do Brasil (Tabela 2.6), também as estatísticas apresentadas na Tabela 2.8 foram contrastadas com a composição para o ano de 2012 de LECKNER.

Tabela 2.9 - Estimativa da composição gravimétrica dos RSUs coletados nos Estados Unidos (base seca)

Resíduos	Participação (%)
Material Reciclável	56
Metais	6
Papel	32
Plástico total	11
Vidro	7
Matéria Orgânica	27
Outros	17
Total	100

Fonte: Adaptado de LECKNER

É importante ressaltar que a interpretação dos dados estatísticos apresentados se restringe a análise comparativa dos dados, uma vez que a investigação sobre os métodos adotados pelas fontes não se adequa ao propósito do presente estudo.

2.2 Gaseificação

Gaseificação é o processo de termoconversão de matéria orgânica, sólidas ou líquidas de baixo/médio nível energético, em gases combustíveis ou produtos químicos de alto valor agregado, como hidrogênio e metano. Diferente do processo de combustão, onde ocorre oxidação de hidrogênio e carbono a gaseificação adiciona hidrogênio e remove carbono da matéria prima para a produção de gases com alta relação hidrogênio-carbono (H/C). (BASU, 2013)

O início da aplicação do processo de gaseificação para conversão de biomassa teve notoriedade na Europa durante e pouco depois da Segunda Guerra Mundial, quando a escassez do Petróleo forçou a busca por combustíveis alternativos. No Brasil como no restante do mundo a indústria automobilística popularizou o processo de gaseificação para geração de combustível automotivo, aqui os gaseificadores eram chamados de gasogênio. No ano de 1940 o então Presidente Getúlio Vargas baixou um decreto que resultou na instituição da Comissão Nacional do Gasogênio. No entanto o desenvolvimento da tecnologia sofreu uma grande interrupção em 1946 depois da Segunda Guerra devido à competitividade dos combustíveis derivados do petróleo. Os pesquisadores e produtores de gaseificadores da década mudaram suas áreas de atuação e apenas uma pequena fração de conhecimento dessa época foi publicada, grande parte da experiência empírica de projeto e operação se perdeu. (REED e DAS, 1988; NEATHERY, 2010).

O interesse pela gaseificação de biomassa, resíduos agrícolas, rejeitos industriais como bagaço de cana e madeira e RSU está em crescimento desde a última década, quando as discussões mundiais sobre o aquecimento global, a diminuição das reservas de combustível fóssil e o consequente aumento de preços dos combustíveis derivados dessa matriz entraram em evidência. (NEATHERY, 2010)

Esse processo é flexível à utilização de muitos reagentes, inclusive a biomassa oriunda de aterros sanitários. O processo de gaseificação devidamente aplicado em tal cenário pode converter o passivo ambiental em fonte de energia e créditos de carbono, uma vez que a matéria prima é um resíduo de outros processos.

A gaseificação bem como a maioria dos processos depende de uma série de etapas para que se atinja o objetivo de conversão. Do ponto de vista químico e termodinâmico

pode-se dividir tal processo em quatro etapas básicas, adequação da matéria-prima, pirólise, combustão parcial e gaseificação.

A primeira etapa antecede a entrada da biomassa no reator e é geralmente composta pelas operações de trituração e secagem. O tamanho das partículas é uma das variáveis de grande influência no processo de gaseificação, pois afeta a transferência de calor e massa e reações químicas. A secagem é basicamente a adequação da umidade presente na biomassa a ser gaseificada com o intuito de minimizar a energia fornecida para as etapas subsequentes. Essa operação pode ocorrer através da compressão da matéria ou por aquecimento próximo à zona de inflamação da biomassa, 100- 200 °C, nesta faixa de temperatura a água fracamente ligada à biomassa é removida irreversivelmente e com o aumento da temperatura substâncias de baixo peso molecular, constituintes da biomassa, são volatilizadas até que se atinja os 200 °C (FREI et al., 2010; BASU, 2013).

Para produção de gás combustível com razoável poder calorífico é comum o uso de biomassa com umidade de 10-20% (base seca) (BASU, 2013).

Com o intuito de representar as transformações químicas presentes nas etapas desse processo é comum considerar a biomassa como um pseudo-composto $CH_wO_xN_yS_z(biomassa)$, onde w, x, y e z são relações entre hidrogênio, oxigênio, nitrogênio, enxofre e o carbono. Essa simplificação minimiza os efeitos da complexidade ligada a composição da biomassa, abordada no capítulo anterior (FREI et al., 2010)

Assim, pode-se representar o processo pela equação (1).

A pirólise, segunda etapa do processo, é a decomposição térmica na ausência de ar/oxigênio de moléculas com longas cadeias carbônicas, como a celulose, em moléculas menores (líquidos ou gases). Inicialmente os produtos da reação são condensáveis e carvão. Parte dos condensáveis é "quebrada" em compostos menores não condensáveis (CO, CO₂, H₂, e CH₄), sendo o processo representado pela equação (17).

A pirólise ocorre tipicamente entre as temperaturas de 300 °C e 650 °C e os produtos dessa etapa são diretamente dependentes da taxa de aquecimento aplicada a operação, que a classifica como pirólise lenta ou rápida. No caso onde a pirólise é parte do processo de gaseificação é interessante que a pirólise seja rápida, pois há o aumento da produção de gases. Enquanto na lenta, o produto de interesse é o carvão (FREI et al, 2010; BASU, 2013; MATERAZZI et al., 2013).

Os compostos líquidos “piche”/óleos são instáveis em temperaturas acima de 600 °C e rapidamente craqueados na faixa entre 700 e 800 °C. (REED e DAS, 1988).

A maioria das etapas do processo de gaseificação é endotérmica e para suprir a demanda de energia do processo deve ocorrer a combustão parcial da matéria destinada à gaseificação. As principais reações de combustão são apresentadas nas equações **Erro! Fonte de referência não encontrada.** e **Erro! Fonte de referência não encontrada.**, onde a primeira é a principal fonte de calor, uma vez que libera três vezes mais energia (394 kJ/mol de C) que a segunda (110,5 kJ/mol de C). No entanto ambas ocorrem simultaneamente e a seletividade do oxigênio depende da temperatura.

Para a maioria dos processos as etapas são delimitadas através de equipamentos e/ou operações unitárias nesse, porém as etapas nem sempre são delimitadas fisicamente e podem coexistir em determinadas condições de temperatura e pressão, como a combustão parcial e a gaseificação.

A última etapa do processo é a gaseificação, que envolve as reações entre os hidrocarbonetos, dióxido de carbono, oxigênio e hidrogênio. De todas as reações envolvidas as mais importantes são as de gaseificação do “carvão” produzido na etapa de pirólise, que não se limita apenas a carbono puro e sim uma mistura de carvão e hidrocarbonetos. As reações apresentadas através das equações (4) – (17) mostram

como os agentes gaseificantes reagem com o carbono convertendo-o em gases de baixo peso molecular. Cabe ressaltar que essas reações são heterogêneas.

Dentre elas a mais rápida é a reação entre o carvão e o oxigênio e a mais lenta a do carvão com o hidrogênio formando metano. A reatividade relativa entre as mesmas pode ser representada através da equação (17) (BASU, 2013).

$$R_{C+O_2} \gg R_{C+H_2O} > R_{C+CO_2} \gg R_{C+H_2} \quad (8)$$

A reação de gaseificação do carbono por vapor d'água também conhecida como *water-gas-reaction* é umas das mais importantes reações de gaseificação, pois dependendo das condições do meio reacional pode produzir CH_4 e CO ou H_2 e CO . Alguns modelos cinéticos atribuem parte de tal resultado a existência da inibição do hidrogênio na gaseificação pelo vapor, mas ainda há a reação intermediária conhecida como *Shift*, ou ainda *WGS* que ocorre entre o vapor d'água e os produtos da reação de gaseificação em fase gasosa, equação (17), que não é favorável em elevada temperatura por se tratar de uma reação exotérmica (BASU, 2013; FREI et al., 2010).

A gaseificação do carbono em dióxido de carbono é comumente denominada Reação de *Boudouard* e apresenta baixa taxa de reação em condições de temperatura inferiores a 1000 K e nessas condições é considerada insignificante.

A reação de gaseificação do carvão em meio rico em hidrogênio também intitulada Reação de Hidrogaseificação é a principal rota de formação de metano.

As etapas que levam a corrente de produtos gasosos (corrente de interesse) podem ser simplificadas e representadas pela equação (17) ignorando a umidade presente

no meio e considerando a produção mínima de hidrocarbonetos líquidos e carvão (BASU, 2013).

Além das reações já apresentadas outras tantas ocorrem durante o processo de gaseificação, conforme apresentado na Tabela 2.10, fato que confere a complexidade no dimensionamento do processo devido à cinética das mesmas.

Tabela 2.10 - Reações Típicas do processo de Gaseificação.

Reações Típicas do Processo de Gaseificação
Oxidação
$CO + 0,5O_2 \rightarrow CO_2$
$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_2O$
$H_2 + 0,5O_2 \rightarrow H_2O$
Metanização
$2CO + 2H_2 \rightarrow CH_4 + CO_2$
$CO + 3H_2 \rightarrow CH_4 + H_2O$
$CO_2 + 4H_2 \rightarrow CH_4 + 2H_2O$
Reforma por vapor
$CH_4 + H_2O \rightarrow CO + 3H_2$
$CH_4 + 0,5O_2 \rightarrow CO + 2H_2$

Fonte: Autor

Os agentes gaseificantes também chamados de “meio” são as substâncias que reagem com o carbono sólido ou constituinte de moléculas grandes e os converte em moléculas de baixo peso molecular como CO, CO₂ e H₂. Esses agentes afetam diretamente o HHV (Poder calorífico superior) e a composição dos produtos da gaseificação (BASU, 2013; FREI et al., 2010). A Figura 2.4 ilustra a influência do agente gaseificante na composição dos produtos da gaseificação.

Se o oxigênio é utilizado como agente os produtos tendem para a geração de CO e CO₂, de modo que quanto maior a quantidade de oxigênio também maior a tendência

O processo de gaseificação é composto de uma série de etapas, onde ocorrem também muitas reações, de modo que algumas delas ocorrem em paralelo e são afetadas parcialmente no decorrer do processo.

A determinação das extensões das reações se dá através da consideração da proximidade do estado de equilíbrio termodinâmico. Nessa condição o sistema atinge a composição mais estável e garante do ponto de vista termodinâmico a máxima conversão para uma dada condição de reação. Duas abordagens podem ser adotadas para a modelagem do sistema, a primeira é a estequiométrica, através da adoção de uma taxa de reação a uma dada temperatura e a segunda não estequiométrica, por meio do método de minimização da energia livre de Gibbs, função termodinâmica que em condição de equilíbrio atinge seu valor mínimo (LIA et al., 2003) .

A abordagem estequiométrica requer a informações sobre espécies químicas e mecanismos de reações envolvidos em todo o processo, ponto de grande desafio quando se trata de gaseificação de matéria de composição química complexa.

No método não estequiométrico apenas a composição elementar da alimentação é requerida, que pode ser obtida através da técnica *ultimate analysis*, o que representa uma grande vantagem para processos onde a composição química da alimentação não é clara ou conhecida, como nos processos que envolvem conversão de biomassa.

Para um sistema a temperatura e pressão constantes, o critério de equilíbrio é dado pela equação (17).

$$dG = \sum_{i=1}^N \mu_i dn_i = 0 \quad (11)$$

No entanto a variação do número de moles dos componentes gasosos não pode ser considerada independente, pois deve atender ao balanço dos elementos, considerado a restrição para a modelagem termodinâmica. O balanço de elementos é representado na equação (12), onde b_j representa o número total de átomos do elemento j presente no sistema e é o mesmo da composição inicial e a_{ij} é o número de átomos do elemento j presente na molécula da espécie química i .

$$b_j = \sum_{i=1}^N (n_i a_{ij})_{IN} = \sum_{i=1}^N (n_i a_{ij})_{OUT} \quad (j = 1, 2, \dots, k) \quad (12)$$

$$\sum_{i=1}^N (n_i a_{ij})_{OUT} - b_j = 0 \quad (13)$$

O potencial químico do componente i pode ser calculado através da equação (17), onde f_i é a fugacidade do componente i , R a constante universal dos gases ideais, T a temperatura, G_i^o a energia livre de Gibbs padrão e f_i^o a fugacidade padrão para o componente i .

$$\mu_i = G_i^o + RT \ln \left(\frac{f_i}{f_i^o} \right) \quad (14)$$

Considerando que o processo ocorre à baixa pressão e que nessa condição os gases se aproximam da idealidade e assim sua fugacidade passa a ser a própria pressão parcial e G_i^o pode ser considerada a energia livre de Gibbs padrão $G_{f,i}^o$, que por definição é nula para os elementos em seus estados padrão.

$$\mu_i = G_{f,i}^o + RT \ln(y_i) \quad (15)$$

Substituindo a equação (15) na equação (11) determina-se a função a ser minimizada, expressa pela equação (17).

$$G_{TOTAL}(n_i, T) = \sum_{i=1}^N n_i \Delta G_i^o + \sum_{i=1}^N n_i RT \ln(y_i) \quad (16)$$

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Especificação da composição elementar dos resíduos

Um dos maiores desafios na aplicação de tecnologias de termoconversão dos RSUs é a dificuldade de obtenção de dados referente à composição representativa do mesmo.

As variações na composição de resíduos domésticos devido a hábitos regionais e culturais, urbanização, clima e políticas de gerenciamento de resíduos são expressivas, bem como a variação referente aos resíduos industriais que variam de acordo com as características de cada segmento industrial.

São essas variações que conferem o alto grau de dificuldade para a determinação de uma amostra que tenha boa representatividade a ponto de refletir as propriedades químicas, poder calorífico, entre outras propriedades físicas do resíduo a ser processado (NIESSEN, 2002). A determinação de uma amostra de RSUs tecnicamente representativa para a realização de ensaios físico químicos demanda um estudo dedicado a esse fim, que não se enquadra no objetivo do presente estudo.

Atualmente duas técnicas de análise são amplamente utilizadas para a determinação de propriedades físico-químicas de biomassa destinadas a processos de reaproveitamento energético, conhecidas pelas denominações *Proximate Analysis* e *Ultimate Analysis*. Ambas foram desenvolvidas para a determinação das propriedades do carvão e são descritas detalhadamente em publicações da *American Society for Testing Materials (ASTM)* (REED e DAS, 1988).

Tais técnicas compreendem objetivos distintos, não se sobrepondo. A *Proximate Analysis* (PA) é estruturada para a determinação da umidade, carbono fixo, compostos orgânicos voláteis e quantidade de cinzas contidas nos RSUs. Enquanto que a *Ultimate Analysis* (UA) tem como objetivo determinar a composição química e uma fórmula química que represente aquela composição para um dado RSUs (ARAFAT e JIJAKLI, 2013).

Muitos dados de *Proximate* e *Ultimate Analysis* estão disponíveis na literatura, mas poucas são as fontes que discriminam a composição em relação aos macrocomponentes. No intuito de minimizar possíveis variações devido a seleção de

dados de diferentes macrocomposições, será utilizada nesse estudo a metodologia desenvolvida por Niessen (NIESSEN, 2002) para a estimativa da composição do resíduo a partir da composição gravimétrica dos seus macrocomponentes.

A Tabela 3.1 apresenta uma pequena parte do estudo de Niessen (NIESSEN, 2002), que catalogou os resultados de diversas análises para os mais variados macrocomponentes isolados, ou seja, antes de compor o RSU. No entanto quando os componentes se encontram misturados, RSU, há variação de sua contribuição na mistura devido ao efeito da umidade contida em cada fração dos componentes. Esse é desconsiderado no presente trabalho por se tratar de uma parcela de matéria absorvente menor que 20% do total alimentado.

Tabela 3.1 - Proximate e Ultimate Analysis e HHV para os macrocomponentes dos RSUs (base seca)

Categoria	C%	H%	O%	N%	S%	M%	V%	FC%	Ash%	HHV(kcal/kg)
Metal	4,54	0,63	4,28	0,05	0,01	3				0
Papel	43,41	5,82	44,32	0,25	0,2	10,24	75,94	8,44	5,38	3778
Plástico	60	7,2	22,6	0	0	2	0	0	10	7833
Borracha	77,65	10,35	0	0	2	1,2	83,98	4,94	9,88	6222
Texteis	46,19	6,41	41,85	2,18	0,2	31	0	0	0	0
Madeira	49,7	6,1	42,6	0,1	0,1	6	80,92	11,74	1,34	4083
Alimentos	49,06	6,62	37,55	1,68	0,2	78,24	17,1	3,55	1,06	997
Limpeza de Rua	34,7	4,76	35,2	0,14	0,2	20	54	6	20	2667
Vidro	0,52	0,07	0,36	0,03	0	2				0

Fonte: Niessen, 2002.

Conhecer a composição química dos resíduos destinados à gaseificação é muito importante e ainda mais quando são esses resíduos sólidos. Essa importância está diretamente ligada à concentração de materiais inorgânicos e não combustíveis que se comportarão como inertes nas reações, mas são muito importantes do ponto de vista de dimensionamento energético do sistema, bem como para a definição do material a ser descartado como saída do processo.

Carbono (C), hidrogênio (H), e oxigênio (O) são os principais constituintes da fração combustíveis dos resíduos. De modo que é possível estimar com grande assertividade o poder calorífico da biomassa a partir da concentração destes elementos.

A quantidade de Nitrogênio (N) na composição do poder calorífico superior não é tão significativa como dos elementos já citados, como é inerte ao processo de gaseificação age apenas como solvente. No entanto a concentração desse elemento é de extrema

importância para a predição da geração de NO_x, substâncias que devem ser controladas devido à sua contribuição como poluentes do ar (REED e DAS, 1988).

Os teores de Enxofre (S) e Cloro (Cl), assim como o nitrogênio, são fundamentais para o controle de substâncias poluentes do ar. Além disso, a concentração desses elementos é de grande importância pela característica ácida da maioria de seus compostos classificando-os como elementos a serem controlados para evitar a ação corrosiva nos equipamentos.

A concentração de Fósforo (P) pode ser importante para o ponto de fusão da escória oriunda do processo. A presença de compostos fosforados insolúveis diminui a temperatura de fusão a condições inferiores a 800 °C, o que pode ocasionar problemas relacionados a operação dos equipamentos.

Ainda com relação ao ponto de fusão da escória, os elementos Potássio (K) e Sódio (Na), também são importantes, pois indicam a presença de compostos que diminuem a temperatura de fusão da mesma (ex: NaCl, Na₂SO₄).

Devido à falta de informações referentes a composição das cinzas de cada macrocomponente adotou-se como constituintes da corrente de cinzas, os metais ferro e alumínio cuja a fração na composição gravimétrica denominada é significativa e os elementos C, Na e Ca por serem constituintes de muitas matérias.

3.2 Definição dos casos de estudo e condições de processo para a simulação

As grandes cidades são as maiores geradoras de resíduos urbano e também as mais impactadas com a restrição de área para instalação de aterros, realidade que motivou a aplicação do estudo para a região mais populosa da cidade de São Paulo, sub-região do Campo Limpo, estimativa de 659.911 habitantes no ano de 2015 com taxa de geração de resíduo per capita de resíduos de 0,8kg/dia. (SÃO PAULO EM NÚMEROS).

Para o modelo computacional desenvolvido para a planta de gaseificação de resíduo sólido urbano considerou-se uma capacidade de processamento de 328,5 t/dia. Esta vazão de alimentação do processo simula o tratamento de todo o resíduo produzido

na região do Campo Limpo em um dia. A estimativa tem como base os dados de disposição de resíduos e densidade demográfica da Prefeitura de São Paulo.

O estudo tem como interesse principal a composição da corrente do gaseificador que fisicamente é um único equipamento, mas para implementação do modelo no simulador de processos foi segmentado em blocos distintos, cuja definição do princípio de funcionamento é abordada no item 3.3.3. Devido ao viés de reaproveitamento energético o estudo propõe a implementação de um processo de geração de energia acoplado ao processo de gaseificação, denominado processo secundário, no qual o vapor superaquecido a 10 bar a e 284 °C é admitido em uma turbina, cuja saída é apresentada na tabela 4.6. Equipamentos secundários foram modelados considerando rendimento de 80% para bombas, compressores e turbinas.

O meio utilizado para promover a reação de gaseificação, o agente gaseificante, é a variável manipulada no estudo. Serão estudados os impactos gerados na corrente de interesse em função do emprego dos seguintes agentes: ar, vapor e ar mais vapor.

O estudo foi conduzido com três diferentes casos, cujas variáveis manipuladas foram a vazão e o tipo de agente gaseificante. Para as demais entradas do processo, como vazão de alimentação de RSU, expressa na Tabela 3.2, os parâmetros de pressão e temperatura foram as mesmas nos três casos.

Tabela 3.2 - Dados de entrada para a simulação dos modelos.

Corrente	ALIM	Análises (% mássica)			
Vazão (kg/h)	13.686,50	Proximate		Ultimate	
Temperatura (°C)	25	M	46,81	CINZAS	11,33
Pressão (bar a)	2,01325	CF	9,84	C	47,84
Densidade (kg/m ³)	450	MV	32,05	H	6,31
		CINZAS	11,3	N	1
				Cl	0
				S	0,23
				O	33,29

Fonte: Autor

Tabela 3.3 - Parâmetros dos casos de estudo.

Caso de Estudo	RSU	AR	VAPOR	ER	S/B
CASO 1	13.686,5	15.084,6	17.085,2	0,2	2
CASO2	13.686,5	18.855,8	0	0,25	0
CASO 3	13.686,5	0	21.356,5	0	2,5

*Vazão Mássica (kg/h)

Fonte: Autor

Adotaram-se as faixas de *equivalence ratio* (ER) e *steam-to-biomass* (S/B) comumente aplicadas para os processos de gaseificação de biomassa o que resulta nas vazões dos agentes gaseificantes apresentados na Tabela 3.3.

A razão entre a fração combustível da alimentação do processo, RSU, e o agente gaseificante é um parâmetro importante que influencia na temperatura de operação do gaseificador e também na composição dos produtos da gaseificação. Esse parâmetro recebe diferentes denominações de acordo com o meio gaseificante. Para gaseificação utilizando ar como agente esse parâmetro é denominado *equivalence ratio*, equação (17), e quando há o emprego do vapor como agente denomina-se *steam-to-biomass ratio*. (BASU, 2013; REED e DAS, 1988).

$$ER(<1,0)_{\text{gaseificação}} = \frac{\text{Ar Real}}{\text{Ar Estequiométrico}} \quad (17)$$

Equivalence ratio expressa a relação entre quantidade de ar alimentada no gaseificador para promover a gaseificação e a quantidade necessária para prover a combustão total dos compostos orgânicos da corrente de alimentação do processo (RSUs). Esse valor deve ser menor do que um, de modo a favorecer a gaseificação e não a combustão. Para o *Steam-to-biomass ratio*, os valores comumente utilizados estão na faixa compreendida entre 0,5 e 2,5.

No caso 1 adotou-se a diminuição de 20% do ER e S/B adotados nos demais casos, conservando assim ambos em faixas consagradas pela literatura. Deve-se frisar que a pressão de operação e as temperaturas das etapas de pirólise, combustão parcial e gaseificação foram mantidas as mesmas, independente do meio gaseificante, obviamente em configurações de processo distintas de modo a satisfazer termodinamicamente as operações.

No presente estudo restringiu-se a pressão de operação, definindo-se que todo o processo ocorrerá a pressões baixas, 1 bar manométrico. A pressão de operação típica para os gaseificadores convencionais varia de 1 a 35 bar g (MATERAZZI et al., 2013; BASU, 2013).

A temperatura é outro parâmetro que afeta a composição da corrente dos produtos. No entanto em altas temperaturas poucas são as combinações possíveis entre os principais elementos que compõem os resíduos, a saber, carbono, oxigênio e hidrogênio. As combinações mais favorecidas são C, CO, CO₂, CH₄, H₂ e H₂O. A concentração dessas espécies no equilíbrio pode ser estimada, uma vez estabelecida a pressão, a concentração dos elementos e a constante de equilíbrio determinada a partir de propriedades termodinâmicas e da temperatura. É também possível estimar a composição dos produtos no equilíbrio em função da quantidade de oxigênio adicionada ao sistema. A figura 3.1 ilustra a temperatura que será atingida se uma dada quantidade de biomassa atingir o equilíbrio termodinâmico com a quantidade de oxigênio adicionada ao sistema, essa temperatura é conhecida como temperatura da reação adiabática. (REED e DAS, 1988) e a figura 3.2 apresenta o perfil da composição dos produtos para esse mesmo cenário.

Para a simulação com ar foi estabelecido ER de 0,25, de modo que a temperatura de operação da etapa de gaseificação esteja compreendida na faixa de 810 a 850°C, limite inferior para a faixa de gaseificação, conforme ilustrado na figura 3.1.

A tabela 3.3 apresenta os valores de ER e S/B utilizados em cada um dos casos.

No estudo a temperatura foi estabelecida a partir da literatura para a pirólise 650°C e para as zonas de gaseificação e combustão 850°C, com alimentação de agentes gaseificantes à 600°C. Valores comumente praticados de acordo com a literatura e adequados para a aplicação em tratamento de resíduos não classificados como perigosos.

Figura 3.1

Temperatura da reação adiabática entre biomassa e oxigênio

Fonte: Adaptado de (REED & DAS, 1988)

Figura 3.2 - Composição de equilíbrio do gás para reação com ar

Fonte: Adaptado de (REED & DAS, 1988)

3.3 Desenvolvimento dos modelos de simulação

3.3.1 Simulador de Processos

Atualmente muitos simuladores de processo são utilizados como ferramenta preditiva de ações de engenharia, sendo empregados em uma infinidade de processos da indústria química e petroquímica. No entanto, quando a aplicação requer banco de dados para sólidos e alternativas de modelagem para compostos não convencionais, como os RSUs, o leque de opções diminui significativamente. Dentre as opções, destaca-se o Aspen Plus®, ferramenta já consagrada na engenharia de processos, devido à sua robustez de processamento e facilidade de implementação.

As simulações dos processos de gaseificação de RSUs e geração de energia foram realizadas à luz dos conceitos de balanço de massa e energia, bem como equilíbrio químico, onde aplicável.

O simulador oferece blocos que simulam as operações unitárias a partir da seleção do usuário. O banco de dados contém uma variedade interessante de propriedades físico químicas e termodinâmicas para muitos componentes, essa última de grande importância para garantir que os resultados da análise via minimização da Energia Livre de Gibbs seja coerente com os dados encontrados na literatura.

Na modelagem de todas as rotas estudadas adotou-se o procedimento descrito a seguir:

- Seleção dos pacotes termodinâmicos utilizados para a modelagem de acordo com os dados de composição da alimentação e a previsão de compostos participantes do processo;
- Especificação das correntes de materiais e correntes de energia e seus respectivos parâmetros;
- Especificação dos parâmetros de operação de cada um dos blocos;

3.3.2 Hipóteses Adotadas

Os modelos foram construídos levando em consideração as seguintes hipóteses simplificadoras:

- Processo em Regime Permanente;
- Perda de carga em equipamentos e linhas desconsideradas;
- A etapa de secagem não foi modelada;
- Todos os gases envolvidos no processo apresentam comportamento ideal devido à baixa pressão;
- Geração desprezível de bio- óleo;
- Os sólidos se depositam nos equipamentos e se comportam como inertes após a etapa de gaseificação;
- Todos os blocos se encontram a pressão e temperatura constantes;

3.3.3 Descrição do modelo de gaseificação e geração de energia (cogeração)

As figuras 3.3 a 3.5 apresentam esquemas simplificados dos fluxogramas de processo, destacando-se as etapas efetivamente implementadas seguindo as diretrizes abordadas nos itens anteriores.

Todos os modelos foram desenvolvidos utilizando os seguintes modelos termodinâmicos: SOLIDS, para prever as propriedades dos sólidos convencionais, Peng Robinson, para os componentes convencionais não sólidos devido à sua aplicação para mistura de gases pouco polares e STEAMNBS, para os dados relacionados a vapor d'água. Para a corrente de alimentação, RSUs, a entalpia e a densidade foram estimadas como descrito no 3.2. De fato, todas as etapas do processo de gaseificação ocorrem fisicamente em um único equipamento, no qual é possível determinar a zona onde cada uma das etapas é favorecida. É esse comportamento que permite que cada etapa seja representada pelos seguintes blocos distintos: IM:PIRO, IM:COMB e IM:GASIF.

3.3.3.1 Ultimate Analysis

A modelagem de um processo real muitas vezes necessita de adaptações para conferir melhor representação do mesmo e é essa a função do primeiro bloco do modelo. O reator Aspen Plus yield, RYield (IM:UA) foi usado para converter a composição elementar da corrente de alimentação em um composto com fórmula molecular mínima, obedecendo o resultado da *ultimate analysis*.

3.3.3.2 Pirólise

A pirólise, como já discutido no capítulo 2, é a etapa onde a matéria é decomposta em moléculas menores. O reator Aspen Plus RGibbs é um modelo rigoroso para equilíbrio químico e multifásico baseado na minimização da energia livre de Gibbs. O módulo (IM:PIRO) foi usado para simular a decomposição do RSUs em compostos de pesos moleculares menores. É ele o responsável por simular a conversão da corrente de saída do primeiro reator (IM:UA) em compostos comumente produzidos no processo de pirólise, através da identificação como “input” dos possíveis compostos a serem formados.

3.3.3.3 Combustão Parcial

A etapa de combustão parcial representa a fonte de energia para o processo e foi simulada através da utilização de um reator Aspen Plus RStoic ([IM:COMB](#)). O bloco RStoic é um reator estequiométrico que tem o modelo padrão de combustão.

3.3.3.4 Gaseificação

Para finalizar a modelagem do processo de gaseificação ([IM:GASIF](#)) assim como para a pirólise, tem-se a etapa da gaseificação que é simulada em um reator RGibbs., responsável por determinar todos os possíveis componentes da corrente de saída através da convergência e atendimento do critério da minimização da Energia livre de Gibbs.

3.3.3.5 Gerador de Energia

O processo de geração de energia foi modelado através das seguintes etapas: Combustão em um reator Aspen Plus RStoic da corrente de produto do gaseificador (IM:FORN), que é a fonte de energia identificada por meio da corrente (IM:QFORN) para promover o aquecimento e mudança de estado da água alimentada na caldeira representada pelo bloco Aspen Plus Het(IM:CALD).

Esses blocos são descritos como secundários, pois a convergência dos mesmos depende única e exclusivamente do atendimento do balanço material e energético nas condições de processo implementadas pelo usuário. A figura 6.2 fornece a identificação de cada bloco no modelo e sua respectiva descrição.

Figura 3.4 - Esquema do modelo do processo de gaseificação em meio vapor

Fonte: Autor

Fonte: Autor

4. RESULTADOS

O estudo comparativo é dividido em duas esferas. A primeira tem como volume de controle o processo de gaseificação comum aos três casos e a segunda expande o escopo aos processos secundários de geração de energia.

O estudo foi conduzido de modo a permitir a investigação do comportamento da composição da corrente de gaseificação frente à variação do meio gaseificante. Conforme explicitado no capítulo 3, considerou-se a capacidade de processamento de 328,5 toneladas de RSU por dia (13.686,5 kg/h), quantidade de resíduos gerados e coletados na sub região de Campo Limpo – São Paulo, e a composição apresentada na tabela 3.2:

Com a composição gravimétrica do RSU no Brasil, Tabela 2.6, e os dados apresentados na Tabela 4.1 foram estimados os dados de composição e poder calorífico superior da corrente de RSU (IM: ALIM).

Tabela 4.1 - *Proximate e Ultimate Analysis e HHV* para a composição gravimétrica RSUs-Brasil

Categoria	Composição PNRS	C%	H%	O%	N%	S%	Ash%	M%	V%	FC%	HHV(kcal/kg)
Metal	2,9	0,13	0,02	0,12	0,00	0,00	2,62	0,09	2,84	5,55	0
Papel	13,1	5,69	0,76	5,81	0,03	0,03	0,79	1,34	9,95	1,11	110
Plástico	13,5	8,10	0,97	3,05	0	0	1,38	0,27	0,00	0,00	227
Vidro	2,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	2,4	0,05			180
Matéria Orgânica	51,4	25,22	3,40	19,30	0,86	0,10	2,51	40,22	8,79	1,82	0
Outros	16,7	8,69	1,15	5,00	0,10	0,10	1,65	2,43	9,14	0,95	542
FEED	100	47,84	6,31	33,29	1,00	0,23	11,33	44,39	30,71	9,43	1059

Fonte: Autor

Observa-se a partir dos resultados da *ultimate analysis* que a composição é essencialmente composta dos elementos carbono e oxigênio.

Como também observado por LEME em sua análise para os resíduos da região metropolitana de Belo Horizonte, tabela 4.2

Tabela 4.2 - Características dos RSUs produzidos na região metropolitana de Belo Horizonte

Componente	% w						
Metais	16,7						
Papéis	10						
Plástico	16						
Borrachas	0,4						
Tecidos	2						
Madeira	3						
Alimentos	52	Composição Elementar(%w base seca)					
		Cinzas	C	H	O	S	N
Total		28	40	5	25	0,2	1

Fonte: Adaptado de (LEME, 2014)

Outro parâmetro importante para a simulação obtido através do estudo de Niessen foi a densidade média dos resíduos, que se encontra na faixa de 300 a 450 kg/m³. No estudo será adotado o valor de 450 kg/m³ devido a alta porcentagem de cinzas e carbono fixo apresentado como resultado da PA.

4.1 Análise da composição do produto do processo de gaseificação

As composições e vazões das correntes de produto da gaseificação são fonte de informações relevantes para a avaliação do processo. A partir dessa saída do processo é possível avaliar a tendência do mesmo em favorecer uma ou mais reações de gaseificação. Outro importante aspecto é a possibilidade de utilização desta corrente em outros processos industriais, considerando-se a sua composição rica em hidrogênio e a sua entalpia.

Dentre as reações apresentadas na Tabela 2.10 nota-se a semelhança entre os produtos das reações de reforma em vapor e os compostos formados nos três casos de estudo.

Através da tabela 4.3 e 4.4 também é possível avaliar a presença de agentes poluentes e resíduos do processo de gaseificação para cada caso. No entanto, ressalta-se que no modelo utilizado são consideradas as principais reações envolvidas, em detrimento da possibilidade de previsão da formação vários componentes. Do ponto de vista ambiental, tal limitação deve ser observada.

Comparativamente, destacam-se as baixas quantidades de CO_2 e H_2O e a alta quantidade de CO no caso 2 (rota com ar) em relação a essas quantidades para os casos 1 e 3.

Tabela 4.3 - Vazões molares das correntes de saída dos processos de gaseificação.

Componente/ Corrente	Caso 1 PROD*	Caso 2 PROD*	Caso 3 PROD*
H ₂ O	763,6	61,1	807,8
O ₂	0	0	0
N ₂	415,5	518,4	4,2
S	0	0	0
C ₃ H ₈	0	0	0
CO ₂	244,8	57,0	221,2
C ₄ H ₁₀	0	0	0
CO	229,3	415,5	252,7
C	0	0	0
C ₂ H ₂	0	0	0
C ₆ H ₆	0	0	0
N ₂ O	0	0	0
N ₂ O ₄	0	0	0
NO ₂	7,43E-20	1,09E-21	4,80E-21
H ₂ S	2,29E-01	0,853646	0,535315
H ₃ N	0	0	0
H ₂	661,9	412,5	854,1
Cl ₂	0	0	0
Cl	0	0	0
O ₂ S	0	0	0
Na	0	0	0
Ca	0	0	0
CH ₄	1,25E-01	1,7	0,3
NO	5,27E-10	6,01E-11	4,15E-11
Al ₂ O ₃	4,4	4,4	4,4
CaO	4,4	4,4	4,4
Na ₂ SO ₄	0,6	0	0,3
Fe ₂ O ₃	5,3	5,3	5,3
CaCO ₃	0	0	0
CaSO ₃	0	0	0
Fe	0	0	0
Al	0	0	0
Na ₂ O	3,2	3,9	3,6

* Vazão molar(kmol/h)

Fonte: Autor

Tabela 4.4 - Composições das correntes de saída dos processos de gaseificação

Componente/ Corrente	Caso 1 PROD*	Caso 2 PROD*	Caso 3 PROD*
H ₂ O	33,0	4,2	37,7
O ₂	0	0	0
N ₂	17,9	35,3	0,2
CO ₂	10,6	3,9	10,3
CO	9,9	28,3	11,8
NO ₂	3,21E-21	7,43E-23	2,24E-22
H ₂ S	9,87E-03	5,82E-02	2,50E-02
H ₂	28,6	28,1	39,9
CH ₄	5,41E-03	1,17E-01	1,53E-02
NO	2,27E-11	4,10E-12	1,94E-12

*% molar

Fonte: Autor

4.2 Análise do processo de geração de energia

Estudou-se a etapa de geração de energia elétrica – cogeração -, por meio de turbina a vapor, a partir da combustão do produto da gaseificação, acoplando-se um sistema de geração de vapor. A tabela 4.5 apresenta a composição da corrente de gases de combustão gerados na fornalha da caldeira (IM: FORN) considerando constante a alimentação de ar para combustão de 2.069kmol/h (60.000 kg/h), em pressão de 2 bar e temperatura de 105°C. Optou-se pela fixação da mesma vazão de ar para os três casos, com objetivo de comparação dos três casos. Para o caso 2 observa-se que a vazão alimentada configurou um cenário de excesso de ar, como pode ser observado pela presença da fração de 0,5% molar na corrente dos gases de combustão (IM:GASCOMB). Nos casos 1 e 2 o excesso não é observado e a presença de CO indica que a reação de combustão foi parcialmente incompleta.

Tabela 4.5 - Composições das correntes de saída da fornalha das caldeiras.

Componente/ Corrente	Caso 1		Caso 2		Caso 3	
	GASCOMB *	%MOLAR	GASCOMB*	%MOLAR	GASCOMB*	%MOLAR
H2O	1409,4	35,4	477,9	15,2	1478,3	38,9
O2	0	0,0	16,3	0,5	0	0,0
N2	2060,5	51,8	2163,3	68,7	1649,1	43,3
S	0	0,0	0	0,0	0	0,0
C3H8	0	0,0	0	0,0	0	0,0
CO2	468,4	11,8	474,1	15,0	419,5	11,0
BUT	0	0,0	0	0,0	0	0,0
CO	5,7	0,1	0	0,0	54,6	1,4
C	0	0,0	0	0,0	0	0,0
C2H2	0	0,0	0	0,0	0	0,0
C6H6	0	0,0	0	0,0	0	0,0
N2O	0	0,0	0	0,0	0	0,0
N2O4	0	0,0	0	0,0	0	0,0
NO2	5,13E-10	0,0	6,01E-11	0,0	3,25E-11	0,0
H2S	5,72E-03	0,0	0	0,0	0,1	0,0
NH3	0	0,0	0	0,0	0	0,0
H2	16,6	0,4	0	0,0	184,4	4,8
CL2	0	0,0	0	0,0	0	0,0
CL	0	0,0	0	0,0	0	0,0
SO2	2,23E-01	0,0	0,9	0,0	0,4	0,0
NA	0	0,0	0	0,0	0	0,0
CA	0	0,0	0	0,0	0	0,0
CH4	3,13E-03	0,0	0	0,0	0,1	0,0
NO	1,32E-11	0,0	0	0,0	8,96E-12	0,0
AL2O3	4,4	0,1	4,4	0,1	4,4	0,1
CAO	4,4	0,1	4,4	0,1	4,4	0,1
NA2SO4	0,6	0,0	0	0,0	0,3	0,0
FE2O3	5,3	0,1	5,3	0,2	5,3	0,1
CACO3	0	0,0	0	0,0	0	0,0
CASO3	0	0,0	0	0,0	0	0,0
FE	0	0,0	0	0,0	0	0,0
AL	0	0,0	0	0,0	0	0,0
NA2O	3,2	0,1	3,9	0,1	3,6	0,1

*Vazão molar (kmol/h)

Fonte: Autor

As vazões de vapor gerado nos três casos estão ilustrados na Tabela 4.6. O vapor superaquecido gerado através do aproveitamento da corrente de calor resultante da combustão dos produtos da gaseificação posteriormente convertido à vapor exausto na turbina encontra-se ainda na condição de superaquecimento em cerca de 35 °C, saturação em 133 °C a 3 bara. As condições de entrada e saída da turbina foram mantidas constantes para os três casos de estudo e a variação da vazão de vapor exausto é reflexo do comportamento apresentado pela tabela 4.5, uma vez que a

reação de combustão do monóxido de carbono apresentada na tabela 2.10 é a principal fonte de energia para a geração de vapor. Cada mol convertido disponibiliza 111 kJ de energia por se tratar de uma reação exotérmica.

Tabela 4.6 - Correntes de vapor geradas nos processos acoplados à gaseificação.

	Caso 1	Caso 2	Caso 3	
Corrente	VAP	VAP	VAP	VAP3
Pressão bar a	3	3	3	3
Temperatura (°C)	171	171	171	171
Vazão (kg/h)	68.412	87.746	66.334	45.001

Fonte: Autor

Os modelos foram construídos de modo a permitir a autossuficiência de energia, considerando o suprimento da demanda energética do processo por parte da corrente de trabalho gerada na turbina WTURB. No caso 3, o vapor consumido como agente gaseificante é suprido por parte da corrente VAP, o que implica em uma vazão de vapor exausto disponível, VAP3, menor comparado aos demais casos. A tabela 4.7 indica as potências associadas aos trabalhos de bombeamento e de compressão, assim como o trabalho fornecido pela turbina e finalmente o trabalho líquido. O sinal negativo, saída do volume de controle, o trabalho líquido, $W_{\text{líquido}}$, disponível para exportação para a rede de transmissão de energia.

O potencial energético expresso na Tabela 4.7 é apenas parte do potencial exergético do processo. O presente estudo apresenta uma contribuição para análise do processo de cogeração, salientando que a análise detalhada deste aspecto, bem como toda e qualquer otimização energética está fora do escopo da proposta aqui apresentada. No entanto é importante frisar o potencial exergético das correntes de vapor exausto da turbina e dos gases de combustão provenientes da fornalha que estão em pressão de 1 bara e alta temperatura (350 °C).

Tabela 4.7 - Trabalho consumido/gerado pelos processos de geração de vapor.

Trabalho (kW)	Caso 1	Caso 2	Caso 3
WBOM	0,7		
WBOMBCAL	26,8	34,4	26,0
WCOMP	417,3	521,6	
WTURB	-3250,5	-4169,1	-3151,8
$W_{\text{líquido}}$	-2.805,6	-3.613,1	-3.125,7

Fonte: Autor

5. CONCLUSÃO

Em todos os três casos de estudo a simulação do processo de gaseificação através da metodologia não estequiométrica da minimização da energia Livre de Gibbs apresentou um alinhamento dos resultados obtidos com dados da literatura. Os principais resultados analisados foram a composição do produto da gaseificação e respectivo o potencial energético do produto final.

A rota com maior potencial de geração de hidrogênio é a que emprega o vapor como agente gaseificante, caso 3. Neste caso, foi obtida vazão molar de hidrogênio 52% superior à obtida para o caso ar com associação de vapor e 23% superior à verificada para o caso com ar.

A produção de monóxido de carbono é favorecida pela rota empregando-se ar como agente. As vazões de CO obtidas são 45% e 40% superiores às observadas para o caso ar/vapor e vapor, respectivamente.

O aproveitamento energético na forma de trabalho na turbina é favorecido pela rota empregando-se ar, caso 2, permitindo uma geração de 3,6 MW, 22% superior ao gerado no caso ar e vapor e 13% superior ao gerado no caso vapor. Considerando o consumo médio de energia elétrica é de 208,5 kWh/mês por família (EPE - 2012) e a média de 3,0 habitantes por família (IBGE-2012) é possível concluir que o potencial energético disponível nesse caso equivalente ao abastecimento de 5% das famílias da sub-região do Campo Limpo.

No entanto os três casos apresentam ainda potencial energético devido à condição do vapor exausto da turbina que pode ser aproveitado com a utilização de caldeira de condensação, além do potencial exergético dos gases de combustão (1 bara e 350 °C). Sendo assim conclusões quanto ao potencial exergético devem ser relativizadas, pois podem apresentar diferenças consideráveis frente às modificações no processo de cogeração.

Todo o estudo foi realizado considerando a hipótese de atingimento do equilíbrio termodinâmico que não é a condição real de operação de um processo de gaseificação. Os processos cujo gaseificador são do tipo downdraft são os que mais

se aproximam dessa condição e ainda assim os resultados devem ser tratados como o valor máximo possível de ser atingido na condição ideal o que leva a necessidade de adoção de fatores oriundos de validações experimentais para determinar a relação entre a condição real e ideal.

Possíveis desdobramentos ligados melhoria do processo de geração de energia (cogeração) e/ou acoplamento de processos de aproveitamento dos compostos são sugestão para trabalhos futuros, bem como a validação da composição do resíduo da sub-região de Campo Limpo – São Paulo e dos resultados verificados em planta piloto ou semelhante.

6. ANEXOS

Unidades Territoriais	População				Taxas de Crescimento			Área (ha)	Densidade (pop/ha)				População da Região (%)
	1980	1991	2000	2010	1980/91	1991/2000	2000/2010		1980	1991	2000	2010	
MSP	8.493.226	9.646.185	10.434.252	11.253.503	1,16	0,88	0,76	150.900	56,28	63,92	69,15	74,58	
Aricaanduva/ Formosa/Carrão	298.116	281.788	266.838	267.702	-0,51	-0,6	0,03	2.150	138,66	131,06	124,11	124,51	2,4
Aricanduva	92.790	96.512	94.813	89.622	0,36	-0,2	-0,56	660	140,89	146,23	143,66	135,79	
Carrão	99.218	87.336	78.175	83.281	-1,15	-1,22	0,63	750	132,29	116,45	104,23	111,04	
Vila Formosa	106.108	97.940	93.850	94.799	-0,73	-0,47	0,1	740	143,39	132,35	128,82	128,11	
Butantã	285.031	366.737	377.576	428.217	2,32	0,32	1,27	5.610	50,81	65,37	67,3	76,33	3,8
Butantã	56.934	58.019	52.649	54.196	0,17	-1,07	0,29	1.250	45,55	46,42	42,12	43,36	
Morumbi	31.077	40.031	34.588	46.957	2,33	-1,61	3,1	1.140	27,26	35,11	30,34	41,19	
Raposo Tavares	49.370	82.890	91.204	100.164	4,82	1,07	0,94	1.260	39,18	65,79	72,38	79,5	
Rio Pequeno	84.798	102.791	111.756	118.459	1,76	0,93	0,58	970	87,42	105,97	115,21	122,12	
Vila Sônia	62.853	83.006	87.379	108.441	2,56	0,57	2,18	990	63,49	83,84	88,26	109,54	
Campo Limpo	261.333	355.544	505.969	607.105	3,84	2,77	1,84	3.670	71,21	107,78	137,87	165,42	5,4
Campo Limpo	110.556	159.471	191.527	211.361	3,39	2,06	0,99	1.280	86,37	124,59	149,63	165,13	
Capão Redondo	128.194	193.497	240.793	268.729	3,81	2,46	1,1	1.360	94,26	142,28	177,05	197,59	
Vila Andrade	22.584	42.576	73.649	127.015	5,93	6,28	5,6	1.030	21,93	41,34	71,5	123,32	
Capela do Socorro	281.029	405.769	563.922	594.930	3,4	3,72	0,54	13.420	20,94	30,24	42,02	44,33	5,3
Cidade Dutra	122.990	168.821	191.389	196.360	2,92	1,4	0,26	2.930	41,98	57,62	65,32	67,02	
Grajaú	117.301	193.784	333.436	360.787	4,67	6,22	0,79	9.200	12,75	21,06	36,24	39,22	
Socorro	40.738	43.194	39.097	37.783	0,53	-1,1	-0,34	1.290	31,58	33,48	30,31	29,29	
Casa Verde/Cachoelrinha	298.093	312.670	313.323	309.376	0,43	0,02	-0,13	2.670	111,65	117,1	117,35	115,87	2,7
Cachoelrinha	108.726	125.852	147.649	143.523	1,6	1,79	-0,28	1.330	79,49	94,63	111,01	107,91	
Casa Verde	103.455	96.396	83.629	85.624	-0,64	-1,57	0,24	710	145,71	135,77	117,79	120,6	
Limão	88.911	90.422	82.045	80.229	0,15	-1,07	-0,22	630	141,13	143,53	130,23	127,35	
Cidade Ademar	282.707	316.795	370.797	410.998	1,04	1,76	1,03	3.070	92,09	103,19	120,78	133,88	3,7
Cidade Ademar	219.649	230.794	243.372	266.681	0,45	0,59	0,92	1.200	183,04	192,33	202,81	222,23	
Pedreira	63.058	86.001	127.425	144.317	2,86	4,47	1,25	1.870	33,72	45,99	68,14	77,17	
Cidade Tiradentes	8.603	96.281	190.657	211.501	24,55	7,89	1,04	1.500	5,74	64,19	127,1	141	1,9
Cidade Tiradentes	8.603	96.281	190.657	211.501	24,55	7,89	1,04	1.500	5,74	64,19	127,1	141	
Ermelino Matarazzo	177.307	198.311	204.951	207.509	1,02	0,37	0,12	1.510	117,42	131,33	135,73	137,42	1,8
Ermelino Matarazzo	80.513	95.609	106.838	113.615	1,57	1,24	0,62	870	92,54	109,9	122,8	130,59	
Ponte Rasa	96.794	102.702	98.113	93.894	0,54	-0,51	-0,44	640	151,24	160,47	153,3	146,71	
Freguesia/Brasília	317.019	354.263	392.251	407.245	1,01	1,14	0,38	3.150	100,64	112,46	124,52	129,28	3,6
Brasília	166.441	201.591	247.328	264.918	1,76	2,3	0,69	2.100	79,26	96	117,78	126,15	
Freguesia do Ó	150.578	152.672	144.923	142.327	0,13	-0,58	-0,16	1.050	143,41	145,4	138,02	135,55	
Guilaneses	119.835	194.180	256.319	268.508	4,49	3,13	0,47	1.780	67,32	109,09	144	150,85	2,4
Guilaneses	50.417	81.373	98.546	103.996	4,45	2,15	0,54	860	58,62	94,62	114,59	120,93	
Lajeado	69.418	112.807	157.773	164.512	4,51	3,8	0,42	920	75,45	122,62	171,49	178,82	
Ipiranga	398.028	423.168	429.235	463.804	0,56	0,16	0,78	3.750	106,14	112,84	114,46	123,68	4,1
Cursino	116.473	110.433	102.089	109.088	-0,48	-0,87	0,67	1.280	90,99	86,28	79,76	85,23	
Ipiranga	117.588	101.533	98.863	106.865	-1,33	-0,3	0,78	1.050	111,99	96,7	94,16	101,78	
Sacombã	163.967	211.200	228.283	247.851	2,33	0,87	0,83	1.420	115,47	148,73	160,76	174,54	
Itaim Paulista	202.710	287.569	359.215	373.127	3,23	2,5	0,38	2.170	93,41	132,52	165,54	171,95	3,3
Itaim Paulista	107.259	163.265	212.733	224.074	3,89	2,98	0,52	1.200	89,38	136,06	177,28	186,73	
Vila Curuçá	95.451	124.300	146.482	149.053	2,43	1,84	0,17	970	98,4	128,14	151,01	153,66	
Itaquera	256.383	431.191	489.502	523.848	4,84	1,42	0,68	5.430	47,22	79,41	90,15	96,47	4,7
Cidade Liber	70.508	97.370	116.841	126.597	2,98	2,05	0,81	1.020	69,13	95,46	114,55	124,11	
Itaquera	126.727	175.366	201.512	204.871	3	1,56	0,17	1.460	86,8	120,11	138,02	140,32	
José Bonifácio	24.049	103.712	107.082	124.122	14,21	0,36	1,49	1.410	17,06	73,55	75,94	88,03	
Parque do Carmo	35.099	54.743	64.067	68.258	4,12	1,76	0,54	1.540	22,79	35,55	41,6	44,32	
Jabaquara	196.151	214.350	214.095	223.780	0,81	-0,01	0,44	1.410	139,11	152,02	151,84	158,71	2,0
Jabaquara	196.151	214.350	214.095	223.780	0,81	-0,01	0,44	1.410	139,11	152,02	151,84	158,71	
Jaguã/Tremembé	176.895	211.905	255.612	291.867	1,66	2,11	1,34	6.410	27,6	33,06	39,88	45,53	2,6
Jaguã	80.080	86.830	91.809	94.609	0,74	0,62	0,3	780	102,67	111,32	117,7	121,29	
Tremembé	96.815	125.075	163.803	197.258	2,36	3,04	1,88	5.630	17,2	22,22	29,09	35,04	
Lapa	319.806	296.122	270.656	305.526	-0,7	-0,99	1,22	4.010	79,75	73,85	67,5	76,19	2,7
Barra Funda	17.894	15.977	12.965	14.383	-1,02	-2,29	1,04	560	31,95	28,53	23,15	25,68	
Jaguara	32.771	29.798	25.713	24.895	-0,86	-1,62	-0,32	460	71,24	64,78	55,9	54,12	
Jaguare	39.867	44.361	42.479	49.863	0,98	-0,48	1,62	660	60,41	67,21	64,36	75,55	
Lapa	83.705	70.319	60.184	65.739	-0,57	-1,71	0,89	1.000	83,7	70,32	60,18	65,74	
Perdizes	117.392	108.840	102.445	111.161	-0,69	-0,67	0,82	610	192,45	178,43	167,94	182,23	
Vila Leopoldina	28.177	26.827	26.870	39.485	-0,45	0,02	3,92	720	39,14	37,26	37,32	54,84	

Figura 6.1 - População censada, taxas de Crescimento Populacional e Densidade Demográfica Município de São Paulo, Subprefeituras e Distritos Municipais

Nome	Tipo	Descrição
ALIM	Corrente de Material	Alimentação de RSU
ELEM1	Corrente de Material	RSU convertido a pseudocomposto
CDR	Corrente de Material	Pseudocomposto aquecido
REAT1	Corrente de Material	Produto da pirólise
AR	Corrente de Material	Ar alimentado em condição atmosférica
WCOMP	Corrente de Energia	Trabalho requerido pelo compressor
ARP	Corrente de Material	Ar pressurizado
ARPQ	Corrente de Material	Ar pressurizado aquecido a 600°C
REAT2	Corrente de Material	Produto da combustão parcial
PROD	Corrente de Material	Produto da gaseificação
ARFORN	Corrente de Material	Ar alimentado na fornalha da caldeira
QFORN	Corrente de Energia	Calor cedido na fornalha
GASCOMB	Corrente de Material	Produto da combustão na fornalha
AGCALD	Corrente de Material	Água de caldeira
AGUCALDP	Corrente de Material	Água de caldeira na condição de 10bara
WBOMBCAL	Corrente de Energia	Trabalho requerido pela comba
VAPORSUP	Corrente de Material	Vapor superaquecido a 10bara
WTURB	Corrente de Energia	Trabalho gerado pela turbina
QSIST	Corrente de Energia	Energia disponibilizada para o sistema
AGUAP	Corrente de Material	Agente gaseificante vapor a 600°C
VAP2	Corrente de Material	Agente gaseificante vapor caso 3
VAP3	Corrente de Material	Vapor exausto disponível caso 3
S4	Corrente de Energia	Energia cedida pela etapa de combustão parcial
QPIROL	Corrente de Energia	Energia cedida pela etapa de pirólise
QGASI	Corrente de Energia	Energia cedida pela etapa de gaseificação
WBOMB	Corrente de Energia	Trabalho requerido peça
UA	Bloco	Conversão de RSU em pseudocomposto
AQCCDR	Bloco	Aquecedor da corrente de pseudocomposto
PIRO	Bloco	Etapa de pirólise
COMB	Bloco	Etapa de combustão parcial
GASIF	Bloco	Etapa de gaseificação
FORN	Bloco	Fornalha da caldeira
CALD	Bloco	Caldeira
BOMBCALD	Bloco	Bomba da caldeira
TURB	Bloco	Turbina
COMP	Bloco	Compressor de ar
AQUEC2	Bloco	Aquecedor do agente gaseificante ar caso 1 e 2
AQC1	Bloco	Aquecedor do agente gaseificante vapor caso 1 e 3

Figura 6.2 - Legenda de abreviações do modelo

7. REFERÊNCIAS

AMBIENTE, M. D. Plano Nacional de Resíduos Sólidos, Brasília, Agosto 2012.

ARAFAT, H. A.; JIJAKLI, K. Modeling and comparative assessment of municipal solid waste. **Waste Management**, Abu Dhabi, v. 33, n. 8, p. 2, August 2013.

ARENA, U. Process and technological aspects of municipal solid waste gasification. A review. **Waste Management**, Caserta, v. 32, n. 4, p. 2, April 2012.

BASU, P. **Biomass Gasification, Pyrolysis, and Torrefaction Practical Design and Theory**. 2. ed. Oxford: Academic Press, 2013.

BEGUM, S. et al. Performance Analysis of an Integrated Fixed Bed Gasifier Model for Different Biomass Feedstocks. **Energies**, Rockhampton, 16 December 2013. 7-10.

FREI, H.; SCHUTH, F.; ZHAO, T. **Thermochemical Conversion of Biomass to Liquid Fuels and Chemicals**. Lexington: [s.n.].

JANAJREH, I. R. **Process aspects in combustion and gaseification Waste-to-Energy(WtE) units. energy Conversion and Management**, pp.2-4. [S.l.]: [s.n.], 2012.

KABIR, M. J.; CHOWDHURY, A. ; RASUL, G. Pyrolysis of Municipal Green Waste: A Modelling, Simulation and Experimental Analysis. **Energies**, Queensland, 23 July 2015. 8-9.

LECKNER, B. Process aspects in combustion and gasification Waste-to-Energy(WtE) units. **Waste Management**, Göteborg, v. 37, p. 2-7, March 2015.

LEME, M. V. et al. Techno-economic analysis and environmental impact assessment of energy recovery from Municipal Solid Waste (MSW) in Brazil. **Resources, Conservation and Recycling**, Itajubá, v. 87, p. 8-20, June 2014.

LI, X. T. et al. Biomass gasification in a circulating fluidized bed. **Biomass and Bioenergy**, Vancouver, February 2004. 171–193.

LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E.; ANDREA, C. Analysis of energy recovery potential using innovative technologies. **Waste Management**, Florence, v. 32, n. 4, p. 2-4, April 2012.

MATERAZZI, M. et al. Thermodynamic modelling and evaluation of two-stage thermal process for waste gasification. **Fuel**, London, v. 108, p. 2-4, June 2013.

NEATHERY, J. **Thermal Conversion of Biomass to Liquids Fuels and Chemicals**. Lexington: RSC Publisher, 2010.

NIESSEN, R. **Combustion and incineration processes**. Third Edition. ed. Andover: MARCEL DEKKER, INC., 2002.

NOBUHIRO, T.; KAZUTAKA, M.; MORIHIRO, O. Co-gasification of municipal solid waste and material recovery in a large-scale gasification and melting system. **Waste Management**, Tokyo, v. 32, n. 4, p. 1-4, April 2012.

REED, B.; DAS, A. **Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems**. Golden: The Biomass Energy Foundation Press, 1988.

SÃO Paulo em Números. Disponível em:
<<http://www.cidadedesaopaulo.com/sp/br/sao-paulo-em-numeros>>. Acesso em: 31 Janeiro 2015.

TCHOBANOGLIOUS, G.; KREITH, F. **Handbook of Solid Waste Management**. Second Edition. ed. [S.I.]: The McGraw-Hill Companies, Inc, 2002.

VERDEGHAIA. www.verdeghaia.com.br. Disponível em:
<<http://www.verdeghaia.com.br/blog/principais-diferencas-entre-lixao-aterro-controlado-e-aterro-sanitario/>>. Acesso em: 29 Julho 2014.

ZHANG, Q. et al. A thermodynamic analysis of solid waste gasification in the Plasma Gasification Melting process. **Applied Energy**, Stockholm, v. 112, p. 1, December 2013.