

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE ELETROTÉCNICA
ESPECIALIZAÇÃO EM ENERGIAS RENOVÁVEIS**

LUCAS FONSECA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGIAS DE QUEIMA
DIRETA E DE GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
BRASILEIROS NA GERAÇÃO DE VAPOR PARA ELETRICIDADE EM
CALDEIRAS AQUATUBULARES**

MONOGRAFIA DE ESPECIALIZAÇÃO

CURITIBA - PR

2017

LUCAS FONSECA

**ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGIAS DE QUEIMA
DIRETA E DE GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
BRASILEIROS NA GERAÇÃO DE VAPOR PARA ELETRICIDADE EM
CALDEIRAS AQUATUBULARES**

Monografia de Especialização apresentada ao Departamento Acadêmico de Eletrotécnica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energias Renováveis.

Orientadora: Profa. Dra. Maria de Fátima dos Santos Ribeiro

CURITIBA - PR

2017

TERMO DE APROVAÇÃO

LUCAS FONSECA

ESTUDO COMPARATIVO ENTRE TECNOLOGIAS DE QUEIMA DIRETA E DE GASEIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS BRASILEIROS NA GERAÇÃO DE VAPOR PARA ELETRICIDADE EM CALDEIRAS AQUATUBULARES

Esta Monografia de Especialização foi apresentada no dia 24 de agosto de 2017, como requisito parcial para obtenção do título de Especialista em Energia Renováveis – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. O aluno foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior

Coordenador de Curso de Especialização em Energias Renováveis

Prof. Romildo Alves dos Prazeres

Chefe do Departamento Acadêmico de Eletrotécnica

BANCA EXAMINADORA

Profa. Dra. Maria de Fátima dos S. Ribeiro
Orientadora - UTFPR

Prof. Dr. Jair Urbanetz Junior
UTFPR

Me. João Fávaro de Oliveira
Membro Externo

O Termo de Aprovação assinado encontra-se na Coordenação do Curso

Dedico esse trabalho à minha família e,
em especial, à minha mãe que sempre
esteve do meu lado e me apoiou.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à minha mãe e aos meus familiares por todo apoio e suporte prestados ao longo da minha vida estudantil e profissional. Sem eles a maioria das minhas conquistas não seria possível.

Um agradecimento a todos os meus amigos que estiveram presentes durante minha caminhada e souberam respeitar a minha ausência nos momentos de estudo e dedicação.

Ainda, um agradecimento a todos os professores do curso de Energias Renováveis da UTFPR, em especial a professora Dra. Maria de Fátima dos Santos Ribeiro por toda a orientação e ajuda no desenvolvimento desse trabalho.

Por fim, agradeço a todos os meus colegas de sala por todos os bons momentos que passamos juntos durante esse último ano.

Deus dá a todos uma estrela. Uns fazem
da estrela um Sol. Outros nem
conseguem vê-la.
(KOLODY, Helena, 1986)

RESUMO

FONSECA, Lucas. Estudo Comparativo Entre Tecnologias de Queima Direta e de Gaseificação de Resíduos Sólidos Urbanos Brasileiros na Geração de Vapor para Eletricidade em Caldeiras Aquatubulares. 2017. 52 f. Monografia de Especialização em Energias Renováveis- Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2017.

Cerca de 200.000 toneladas de resíduos sólidos urbanos são gerados por dia no Brasil. Esse resíduo pode servir de combustível para geração de energia elétrica, desfogando aterros e contribuindo para a matriz energética brasileira. Esses combustíveis podem ser utilizados diretamente em estado sólido em caldeiras a grelha, de leito borbulhante ou leito circulante ou podem passar por um processo de gaseificação antes de serem alimentados em caldeiras a gás. O objetivo do trabalho é comparar cada uma das opções em critérios como custo, geração de energia e emissões atmosféricas. É realizada uma pesquisa qualitativa das RSUs e das tecnologias de queima para então realizar essa comparação e chegar à conclusão de que a melhor tecnologia a ser empregada depende de fatores como disponibilidade e composição do RSU, o montante financeiro que pode ser gasto no projeto e dos limites de poluentes que podem ser emitidos para atmosfera.

Palavras-chave: RSU. Caldeira. Gaseificação. Combustão. Energia.

ABSTRACT

FONSECA, Lucas. Comparative Study Between Direct Combustion and Gasification of Brazilian Urban Solid Waste Technologies to Produce Electricity Steam in Water Tube Boilers. 2017. 52 p. Monograph for Renewable Energy Specialization - Federal Technology University – Paraná. Curitiba, 2017.

About 200.000 tons of urban solid wastes are generated per day in Brazil. This waste can be used as fuel for electrical power generation, relieving waste landfills and contributing for Brazilian energy matrix. This fuel can be used directly in solid state in grate, bubble bed or circulating bed boilers or can pass through a gasification process before being fed in gas boilers. The purpose of the paper is to compare each one of the options with criterias like cost, energy generation and atmospheric emissions. It was made a qualitative research of the Brazilian Urban Solid Waste and of the different burning technologies in order to make the comparison between them and get to the conclusion that the best technology to be used depends on factors like composition and availability of urban waste, the amount of money to be invested on the project and limits of emission limits to the atmosphere.

Keywords: Urban Solid Waste. Boiler. Gasification. Combustion. Energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1–Caldeira aquatubular	22
Figura 2–Caldeira a grelha do fornecedor Babcock&Wilcox	24
Figura 3–Características de fluidização em caldeiras	26
Figura 4–Corte de uma caldeira de leito fluidizado borbulhante.....	27
Figura 5– Combustíveis para queima em caldeiras de leito fluidizado.....	29
Figura 6–Componentes de uma Caldeira de Leito Circulante	30
Figura 7–Figura em corte de uma caldeira de leito circulante	31
Figura 8 – Usos para o gás de síntese.....	32
Figura 9–Figura em corte de um gaseificador	33
Figura 10–Comparação entre queima do gás de gaseificação em caldeiras vs turbinas	34
Figura 11–Planta de gaseificação de resíduos em Lahti - Finlândia	35
Figura 12 – Diagrama simplificado de formação de poluentes a partir da combustão de resíduos sólidos	37
Figura 13 – Processo de pirólise para obtenção de bio-óleo	38
Figura 14 – Queima do gás de síntese em duas caldeiras separadas.....	39
Figura 15 – Queima do gás de síntese em apenas uma caldeira com combustível auxiliar	40
Figura 16–Usina de recuperação de energia URE Barueri	44

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Análise dos municípios que possuem iniciativa de coleta seletiva no Brasil	42
Gráfico 2 - Disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação.....	42

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação dos resíduos sólidos urbanos em biogênicos e não-biogênicos	19
Tabela 2 - Poder calorífico superior típico dos materiais nos resíduos sólidos urbanos	20
Tabela 3 – Comparação qualitativa entre queima de lodo por diversas tecnologias.	36
Tabela 4 - Quantidade de RSU coletada por regiões e Brasil	41
Tabela 5 - Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos coletados no Brasil	43
Tabela 6–Tabela comparativa de tecnologias	45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	TEMA	14
1.2	PROBLEMAS E PREMISSAS	14
1.3	OBJETIVOS	14
1.3.1	Objetivo Geral.....	14
1.3.2	Objetivos Específicos	15
1.4	JUSTIFICATIVA	15
1.5	PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS.....	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS	18
2.1.1	Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)	18
2.1.2	Classificação dos Resíduos Sólidos.....	18
2.1.2.1	Segundo a origem	18
2.1.2.2	Segundo o material e o poder	19
2.1.2.2.1	<i>...Poder calorífico dos principais resíduos urbanos</i>	<i>20</i>
2.2	COMBUSTÃO DIRETA DO COMBUSTÍVEL SÓLIDO EM CALDEIRAS AQUATUBULARES.....	21
2.2.1	Caldeiras a vapor e suas funções	21
2.2.2	Definição de caldeiras aquatubulares.....	22
2.2.3	Tecnologias para queima direta de resíduos sólidos em caldeiras aquatubulares	23
2.2.3.1	Caldeiras a grelha	23
2.2.3.2	Caldeiras com leito fluidizado borbulhante	25
2.2.3.3	Caldeiras de leito circulante	28
2.3	GASEIFICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS E QUEIMA DO GÁS EM CALDEIRAS	31
2.3.1	Gaseificação do combustível sólido	31
2.3.2	Pirólise do combustível sólido	37
2.3.3	Queima do Gás de Síntese na Caldeira	39
3	DESENVOLVIMENTO	41

3.1	O STATUS DOS RESÍDUOS URBANOS SÓLIDOS E DA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DELES NO BRASIL	41
3.1.1	Geração e coleta de resíduos sólidos urbanos no Brasil.....	41
3.1.2	Composição dos Resíduos Sólidos Urbanos Brasileiros.....	43
3.1.3	Geração de Energia em Caldeiras com Resíduos Sólidos no Brasil	44
3.2	COMPARAÇÃO ENTRE AS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS INDUSTRIAIS PARA QUEIMA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM CALDEIRAS AQUATUBULARES.....	45
3.2.1	Comparação das Tecnologias em Face ao Cenário Brasileiro.....	47
4	CONCLUSÃO	41
	REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

A destinação de resíduos sólidos urbanos é um grande desafio para muitas cidades de médio e grande porte brasileiras. Ao mesmo tempo que a população cresce, o consumo dela aumenta e conseqüentemente a quantidade de resíduos gerados se eleva. Nesse mesmo cenário, a solução de acumular os resíduos em lixões, que vigora em diversas cidades, tem levado a um esgotamento desses locais e a problemas ambientais significativos.

Nesse mesmo cenário, o Brasil encontra-se com sua matriz energética pouco diversificada pois, de acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN) de 2015 cerca de 65% da energia elétrica produzida no país é via fontes hidráulicas. Essa falta de diversificação de matriz energética acaba por levar o país a crises em períodos de poucas chuvas, conforme ocorrido nos anos de 2001 e 2014.

Existem tecnologias disponíveis no mercado para a queima desses resíduos em caldeiras que, com a energia proveniente deles, geram vapor da água e conseqüentemente eletricidade. Essa tecnologia é importante frente a outras, como a geração do biogás para movimentar turbinas, pela alta eficiência de conversão do resíduo em eletricidade, a facilidade de emprego em grandes escalas, a diversidade de combustíveis que podem ser aproveitados e o status dessas correntes tecnologias em evitar emissões danosas ao meio ambiente.

Assim, serão estudados o cenário atual de geração de energia via biomassa e de lixo no Brasil, a necessidade ambiental de destinação do lixo urbano em médios e grandes centros urbanos e as tecnologias de caldeiras a grelha, leito fluidizado com resíduos sólidos e a gaseificação do lixo.

1.1 TEMA

Queima de resíduos sólidos urbanos em caldeiras aquatubulares para posterior geração de energia elétrica.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

No Brasil são geradas grandes quantidades de resíduos sólidos urbanos e há dificuldades econômicas e de políticas públicas adequadas para destinação. Além disso, existe uma necessidade da diversificação da matriz energética brasileira, hoje baseada majoritariamente em energia hidrelétrica. No topo desses fatos, há desconhecimento e preconceito por parte de algumas pessoas das vantagens de se utilizar os resíduos sólidos urbanos como combustível para caldeiras. No entanto, já existem várias plantas que utilizam tecnologias de queima de resíduos sólidos urbanos no mundo, mas essas soluções são muito pouco aplicadas hoje no Brasil.

Para endereçar os problemas acima, na confecção do presente trabalho, algumas premissas foram assumidas. Primeiramente, assumiu-se que os dados oficiais utilizados para classificar os resíduos urbanos têm de fato representatividade dentro do território brasileiro e os dados que foram levantados em anos anteriores e são base para esse trabalho, continuam representando a realidade. Então, foi assumido que as diferentes tecnologias para queima de resíduos sólidos em caldeiras têm características comparáveis entre si

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Comparar a tecnologia de combustão direta de resíduos sólidos urbanos com a combustão de gás de síntese gerado a partir da gaseificação de resíduos

sólidos urbanos, visando a geração de eletricidade por meio de vapor superaquecido proveniente de caldeiras aquatubulares.

1.3.2 Objetivos Específicos

- Caracterizar o cenário atual de geração de resíduos sólidos urbanos (RSU) e de energia via lixo no Brasil;
- Descrever a tecnologia de gaseificação de RSU;
- Descrever as principais tecnologias comerciais para queima direta de RSU em caldeiras aquatubulares e para queima do gás de síntese obtido a partir de RSU, em caldeiras aquatubulares;
- Analisar essas tecnologias tendo em vista a condição brasileira no que se refere à geração de RSU.

1.4 JUSTIFICATIVA

O Brasil gera quase 200.000 t/dia de RSUs. Grande parte desse valor tem destinação inapropriada por falta de políticas públicas suficientes para atender todas as necessidades ou por falta de investimento por parte das entidades públicas. Como esse problema tende a aumentar devido a uma crescente geração de resíduos e ao crescimento populacional, esse trabalho se antecipa e aponta alternativas para solução desse problema, de forma a mitigar impactos ambientais, ao mesmo tempo em que viabilize a geração de energia elétrica. (ABRELPE, 2016, p. 18)

A geração de energia por meio de resíduos sólidos já é empregada em muitos lugares pelo mundo. No entanto, em escala comercial existem poucas referências no Brasil, apesar da destinação do lixo em médios e grandes centros urbanos ser um problema conhecido.

Existem diversas opções de aproveitamento dos resíduos sólidos para geração de energia elétrica: a combustão direta dos mesmos em caldeiras, a gaseificação dos resíduos (para posterior queima em motores de combustão interna ou acionamento de turbinas), a pirólise dos resíduos para queimar o óleo resultante em caldeiras ou motores e a biodigestão anaeróbia. Em virtude da possibilidade de

se utilizar resíduos inorgânicos e de se ter referências em escala comercial, foram escolhidas as tecnologias de combustão direta dos resíduos em caldeiras e de gaseificação para o presente estudo.

As tecnologias que permitem a queima desses resíduos em caldeiras que geram vapor (diretamente ou após a gaseificação) são interessantes devido a possibilidade de emprego das mesmas para capacidade relativamente altas, alta disponibilidade (baixa manutenção) desse tipo de equipamento e facilidade de controle de emissões atmosféricas após oxidação (queima) desses resíduos.

1.5 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

O presente trabalho realiza uma pesquisa qualitativa dos RSUs brasileiros e das tecnologias de combustão direta e gaseificação. Ainda, do ponto de vista dos objetivos a que a pesquisa pretende atingir, esta será uma pesquisa descritiva.

Com relação aos procedimentos para realização da pesquisa, serão realizadas pesquisas bibliográficas e documentais. Assim, serão utilizados livros e artigos publicados sobre os assuntos relacionados ao tema do trabalho, bem como será feita pesquisa em documentos e relatórios de organizações governamentais e não-governamentais bem como utilização de documentos fornecidos por empresas que trabalham com as tecnologias descritas no trabalho.

Desse modo, o estudo do resíduo urbano brasileiro será realizado preferencialmente através de portais e estudos do governo federal que representem a situação brasileira.

A pesquisa das tecnologias de combustão direta e gaseificação do combustível será feita através de consulta a sites de fornecedores, material bibliográfico disponível e estudos de caso selecionados.

A descrição das vantagens e desvantagens de cada tipo de tecnologia levantada será feita através de levantamento bibliográfico sobre esses equipamentos.

Por fim, será realizada uma análise, unindo os pontos acima, que nos levará a entender os prós e contras do emprego dessas soluções para o cenário brasileiro.

Os critérios dessa análise são os que seguem:

- Resíduos sólidos biogênicos ou não-biogênicos;
- Poder calorífico dos resíduos sólidos;
- Composição dos resíduos sólidos;
- Investimento na tecnologia;
- Custo de operação;
- Custo de manutenção;
- Capacidade a ser instalada;
- Produção de eletricidade (em termos de eficiência comparando a energia esperada a ser gerada por tonelada de combustível alimentado);
- Flexibilidade na composição do combustível;
- Umidade do combustível;
- Emissões de NOx esperadas;
- Emissões de SOx esperadas;
- Emissões de particulados.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

2.1.1 Definição

A NBR 10004 de 1987 explicita que os resíduos sólidos são:

"aqueles resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades da comunidade de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnicas e economicamente inviáveis face a melhor tecnologia disponível". (NBR 10004, 1987)

O Sistema Nacional de Resíduos Urbanos (SINIR) usa as leis 12.305 artigo 13 e 11.445/2007 artigo 6º para definir que resíduos urbanos são os resíduos que tem como origem atividades domésticas em residências urbanas, os originários da limpeza urbana e os originários de atividades comerciais, industriais e de serviços cuja responsabilidade pelo manejo não seja do gerador do resíduo.

2.1.2 Classificação dos Resíduos Sólidos

2.1.2.1 Segundo a origem

Para o setor de *waste to energy*¹, uma possível classificação dos resíduos é entre resíduos biogênicos e não-biogênicos.

¹ Setor *waste to energy* refere-se ao setor que trabalha com a transformação de resíduos em energia térmica e/ou elétrica.

De acordo com o Departamento de Energia dos Estados Unidos, resíduos biogênicos são os considerados de fontes renováveis por virem de matérias-primas vegetais ou animais. Já os não biogênicos são os que vem de demais processos, como petroquímicos. A Tabela 1 exemplifica essa classificação: (ENERGY DEPARTMENT OF US, 2007, p. 10-11)

Tabela 1 - Classificação dos resíduos sólidos urbanos em biogênicos e não-biogênicos

Biogênicos	Não-Biogênicos
Papel jornal	Plásticos
Papel	PET
Containers e embalagens	HDPE ²
Têxteis	PVC
Resíduos de jardinagem	LDPE/LLDPE ³
Restos de comida	PP ⁴
Madeira	PS ⁵
Couro	Outros plásticos
Outros biogênicos	Borrachas
	Outros não-biogênicos

Fonte: Methodology for Allocating Municipal Solid Waste to Biogenic and Non-Biogenic Energy – Energy Department of US (2007)

Assim, de acordo com a tabela acima, os resíduos biogênicos são compostos por papéis e papelões, sobras de alimentos, madeiras, couro, etc. Já os não-biogênicos são compostos essencialmente por plásticos e borrachas.

2.1.2.2 Segundo o material e o poder calorífico

Poder calorífico é a energia disponível em uma unidade de massa que é transferida quando se realiza a combustão completa da mesma com ar a 1atm e 25°C. A partir desse conceito, obtém a definição de dois termos: poder calorífico superior (PCS) e poder calorífico inferior (PCI) (POLI *et. al*, 2014, p. 12).

² HDPE – Propileno de alta densidade

³ LDPE/LLDPE – Propileno de baixa densidade

⁴ PP - Polipropileno

⁵ PS - Poliestireno

De acordo com Rodrigues, Silva e Rocha, o poder calorífico superior (também conhecido como potência calorífica total ou poder absoluto) é quantidade de energia contida em um combustível quando toda a água líquida contida no combustível mais a que resulta da combustão estão condensadas.

Já o poder calorífico inferior (potência calorífica útil), é a quantidade de energia interna de um combustível considerando a água liberada no estado de vapor. (RODRIGUES, SILVA e ROCHA, 2002, p. 3)

2.1.2.2.1 Poder calorífico dos principais resíduos urbanos

O mesmo estudo do Departamento de Energia dos Estados Unidos da América, levantou o poder calorífico por tonelada dos principais rejeitos encontrados nos RSU's. Esses dados estão apresentados na Tabela 2 (ENERGY DEPARTMENT OF US, 2007, p. 10).

Tabela 2 - Poder calorífico superior típico dos materiais nos resíduos sólidos urbanos

Materiais	10 ⁶ BTU/ton
Plásticos	
PET	20,5
Polietileno de alta densidade	38
PVC	16,5
Polietileno de baixa densidade	24,1
Polipropileno	38
Poliestireno	35,5
Outros	20,5
Borracha	26,9
Couro	14,4
Tecido	13,8
Madeira	10
Comida	5,2
Resíduos de jardinagem	6
Jornal	16
Papel corrugado	16,5
Papéis diversos	6,7

Fonte: Methodology for Allocating Municipal Solid Waste to Biogenic and Non-Biogenic Energy
–Energy Department of US (2007)

De acordo com esse estudo, para materiais não combustíveis, como o vidro e os metais, o poder calorífico pode ser considerado igual a zero.

Analisando a Tabela 2, nota-se que os plásticos, papelões, borrachas e o couro possuem poder calorífico elevado (superiores à madeira). Já os restos de alimento, possuem poder calorífico mais reduzido. Vale ressaltar que o estudo apresenta valores típicos. Esses valores podem variar dependendo da amostra coletada e da composição da mesma.

2.2 COMBUSTÃO DIRETA DO COMBUSTÍVEL SÓLIDO EM CALDEIRAS AQUATUBULARES

2.2.1 Caldeiras a vapor e suas funções

A definição do Ministério do Trabalho para caldeiras através da Norma Regulamentadora 13 (NR-13) é a seguinte:

“Caldeiras a vapor são equipamentos destinados a produzir e acumular vapor sob pressão superior à atmosférica, utilizando qualquer fonte de energia, excetuando-se os refulvedores e equipamentos similares utilizados em unidades de processo.” (NR-13, 2014)

Os principais objetivos de uma caldeira são: (SPIRAX SARCO, 2008, p. 3.1.7).

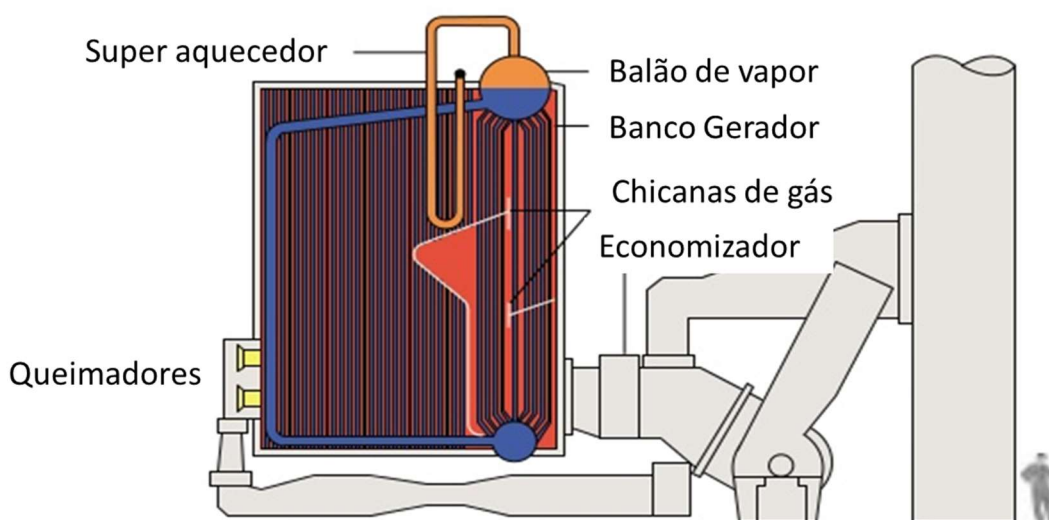
- Liberar a energia contida no combustível na maneira mais eficiente possível;
- Transferir a energia liberada para a água e gerar vapor de maneira mais eficiente possível;
- Separar o vapor da água líquida e exportá-lo para a planta onde a energia pode ser transferida para o processo da maneira mais eficiente possível

2.2.2 Definição de caldeiras aquatubulares

Nascimento (2007, p. 16) define caldeiras aquatubulares como aquelas onde a água a ser vaporizada passa no interior dos tubos que por sua vez, são envolvidos pelos gases de combustão provenientes dos combustíveis.

A Figura 1 ilustra o funcionamento de uma caldeira aquatubular.

Figura 1–Caldeira aquatubular



Fonte: The Steam and Condensate Loop –SpiraxSarco (2008)

O combustível é queimado nos queimadores da figura acima. Água é alimentada e passa pelo economizador para ganhar temperatura e ficar próximo a saturação. Após o economizador ela segue para o balão de vapor, onde ela circula pelo banco gerador e retorna ao balão em uma mistura de vapor saturado e água na temperatura de ebulição (saturação). O vapor sai do balão e passa pelos superaquecedores para ganhar temperatura. As chicanas servem para distribuir os gases de combustão e evitar caminhos preferenciais.

Caldeiras aquatubulares são utilizadas em aplicações que requerem: (SPIRAX SARCO, 2008, p. 3.3.2).

- Vazão alta de vapor (acima de 500 kg/s);
- Vapor a alta pressão (até 160 bar);
- Vapor superaquecido (até 550 °C).

2.2.3 Tecnologias para queima direta de resíduos sólidos em caldeiras aquatubulares

2.2.3.1 Caldeiras a grelha

Macedo (2006, p. 51-52) comenta que as primeiras caldeiras a grelha foram introduzidas no início da década de 20 queimando carvão em grelha fixa. Já no final da década de 40, foram instaladas as primeiras caldeiras com grelhas giratórias para queima de madeira como combustível. As caldeiras à grelha atuais derivam desse tipo com inclusão de algumas inovações tecnológicas.

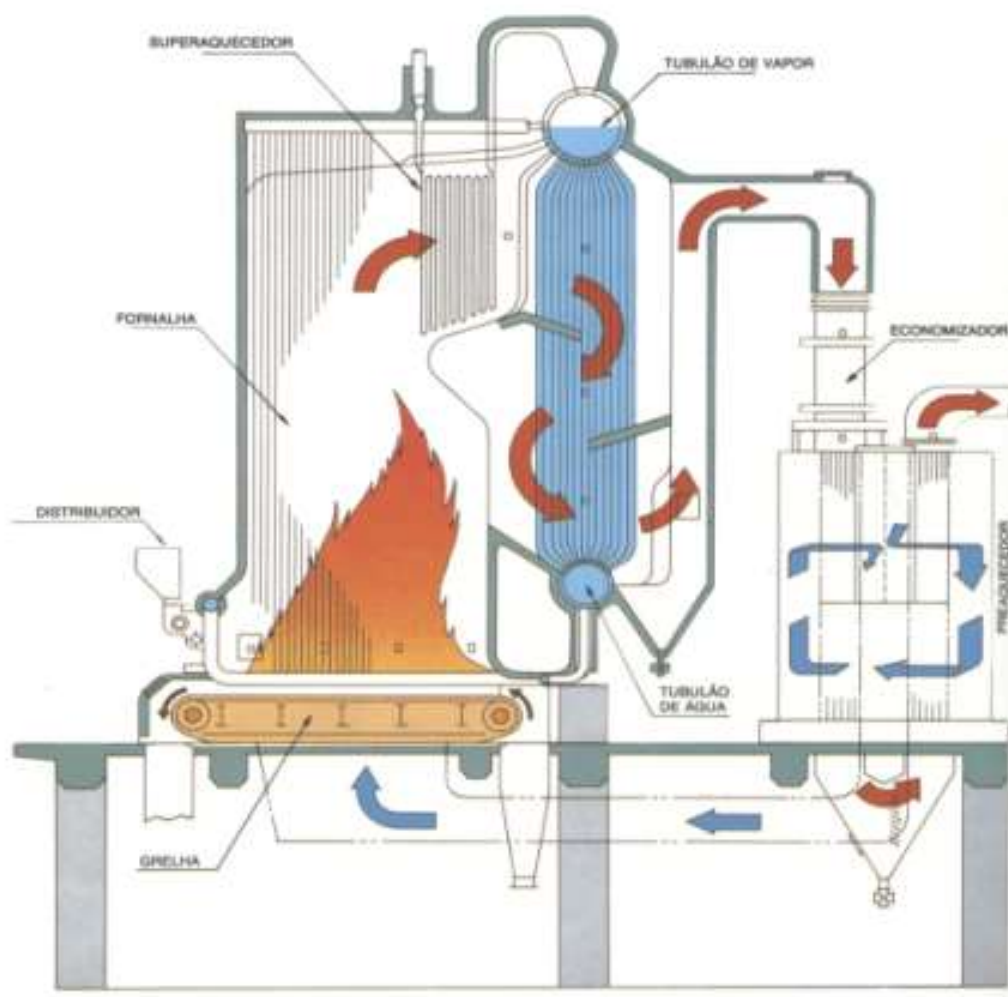
A operação desse tipo de caldeira consiste na contínua alimentação de material através de esteiras transportadoras ou roscas alimentadoras dentro da câmara de combustão onde ocorrem três etapas de forma simultânea: a primeira é a evaporação da água presente no combustível (umidade), a segunda é a pirólise do material e a queima dos compostos voláteis e a última é a queima do carbono fixo.

Segundo esse mesmo autor, a movimentação da grelha ajuda na coleta das cinzas formadas com a queima do combustível sólido, colocado ao longo da superfície da grelha através da mistura do mesmo com ar. (MACEDO, 2006, p. 51-52)

De acordo com Teir (2002, p. 1), a combustão através de grelhas é a aplicação mais comum para combustão de combustíveis sólidos em fornalhas pequenas e médias (15 kW – 30 MW). De acordo com o *Biomass Combustion Manual*, esse tipo de caldeira é apropriada para combustíveis que tenham um alto teor de umidade, tamanhos de partícula variáveis e alto teor de cinzas, devido ao sistema de alimentação mecânica de combustível e remoção do residual não queimado. O sistema de grelha pode ser de vários tipos: grelhas fixas, móveis, rotativas e vibratórias. (MINISTRY OF NEW AND RENEWABLE ENERGY – INDIA, 2015, p. 2-3)

A Figura 2 apresenta um exemplo de caldeiras desse tipo:

Figura 2—Caldeira a grelha do fornecedor Babcock&Wilcox



Fonte: MACEDO (2006)

Macedo (2006, p. 52) escreve ainda que essa caldeira utiliza altas proporções estequiométricas e baixas taxas de transferência de calor. Ar é alimentado pela parte inferior da grelha para resfriar o metal da grelha. Este ar acaba por definir também a temperatura máxima de combustão, dependendo do teor de umidade do combustível. A combustão é completada pelo uso de ar colocado acima da zona de combustão na parte intermediária da caldeira. As paredes da fornalha são formadas por tubos retos, por onde água flui internamente, trocando calor com os gases de combustão, e na parede de tubos há uma curva chamada de “nariz da fornalha” com o objetivo de quebrar a velocidade dos gases de combustão. A fornalha trabalha com temperaturas ao redor de 980 °C para minimizar a formação de NOx térmico e manter a temperatura da fornalha abaixo da temperatura de fusão das cinzas na grelha.

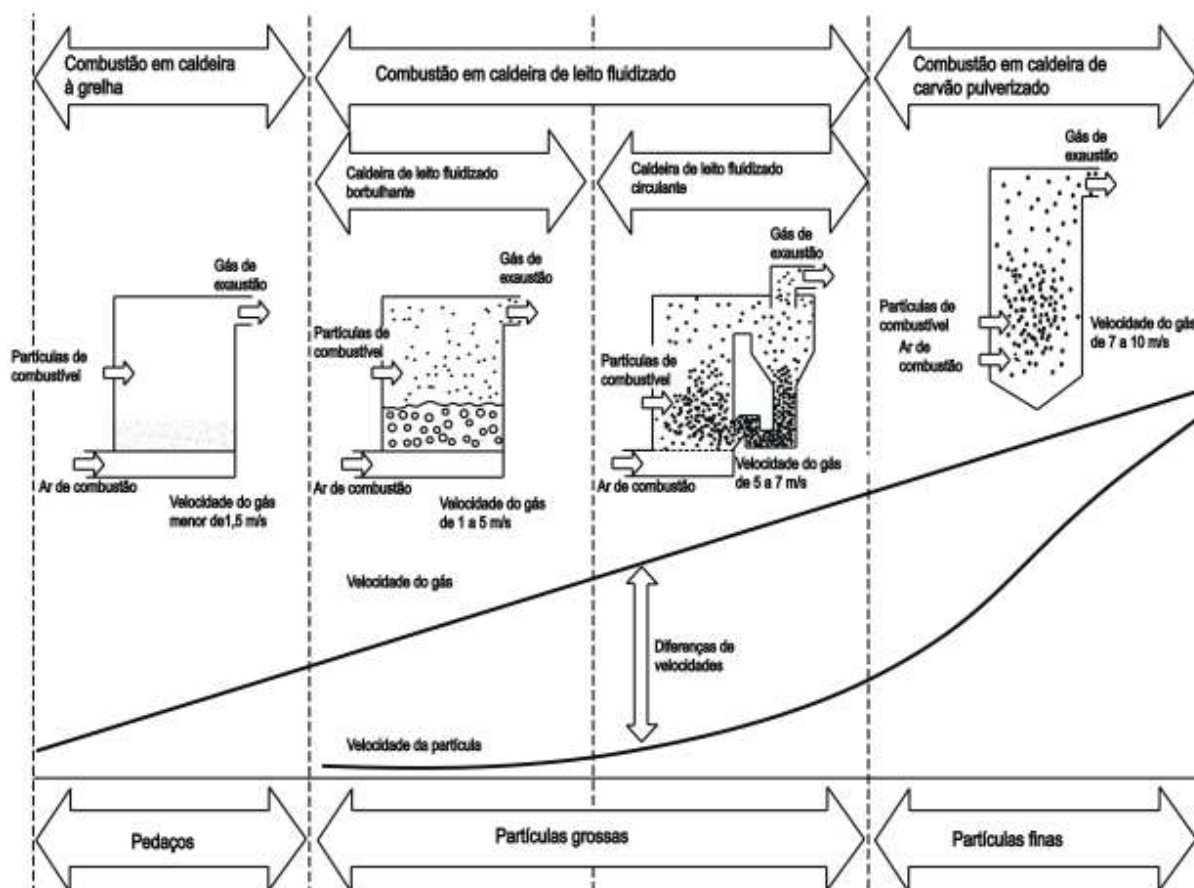
De acordo com o *Biomass Combustion Manual*, a distribuição do combustível pela grelha e a forma como ela se movimenta de um lado a outro da fornalha cria uma distribuição desigual e conseqüentemente uma queima não homogênea do combustível. Devido a essa distribuição desigual e a queima heterogênea são comuns maiores emissões e um aumento da quantidade de não queimados nas cinzas diminuindo a eficiência da caldeira. (MINISTRY OF NEW AND RENEWABLE ENERGY – INDIA, 2015, p. 3)

2.2.3.2 Caldeiras com leito fluidizado borbulhante

Segundo Macedo (2006), as caldeiras de leito fluidizado começaram a ser utilizadas no início dos anos 70, alcançando seu ápice na última década. Uma vez que esse tipo de caldeira permite o uso de diferentes tipos de combustíveis, numa gama que varia de combustíveis de baixa qualidade calorífica e alta umidade até combustíveis de uso tradicional (como cavacos, carvão e lenha), mantendo alto grau de eficiência. Além disso, nesses sistemas a temperatura de combustão é baixa, levando a baixas emissões de NO_x (estudos realizados pelo *Environmental Protection Agency* – EPA dos Estados Unidos demonstram que NO_x é formado em maiores concentrações quando a combustão é realizada a temperaturas mais elevadas). Ainda se tem a possibilidade de alimentar calcário ao leito para reduzir emissões de SO_x. (ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY - EUA, p. 5, 1999)

O princípio de funcionamento desse tipo de caldeira é baseado em uma camada de areia ou outro material inerte, onde o combustível é introduzido e queimado. Essa camada é chamada de leito. Ar de combustão é insuflado através dessa camada de areia, por orifícios abertos na parte inferior da caldeira. Dependendo da velocidade do ar de combustão, a camada consegue ter diferentes comportamentos. As características esperadas em relação ao comportamento do leito podem ser verificadas na Figura 3:

Figura 3–Características de fluidização em caldeiras



Fonte: MACEDO (2006)

Desse modo, neste tipo de caldeira a velocidade do ar de fluidização é baixa, fazendo com que as partículas não sejam carregadas para fora do leito. Assim, a combustão do combustível ocorre no leito (MACEDO, 2006, p. 54 – 56).

A velocidade usual de fluidização para carga máxima da caldeira é levemente menor que 1,2 m/s para que o leito fluidize mas não arraste as partículas. Temperaturas de combustão típicas para esse tipo de caldeira se situam entre 800 e 950 °C (PEÑA, 2011, p. 3).

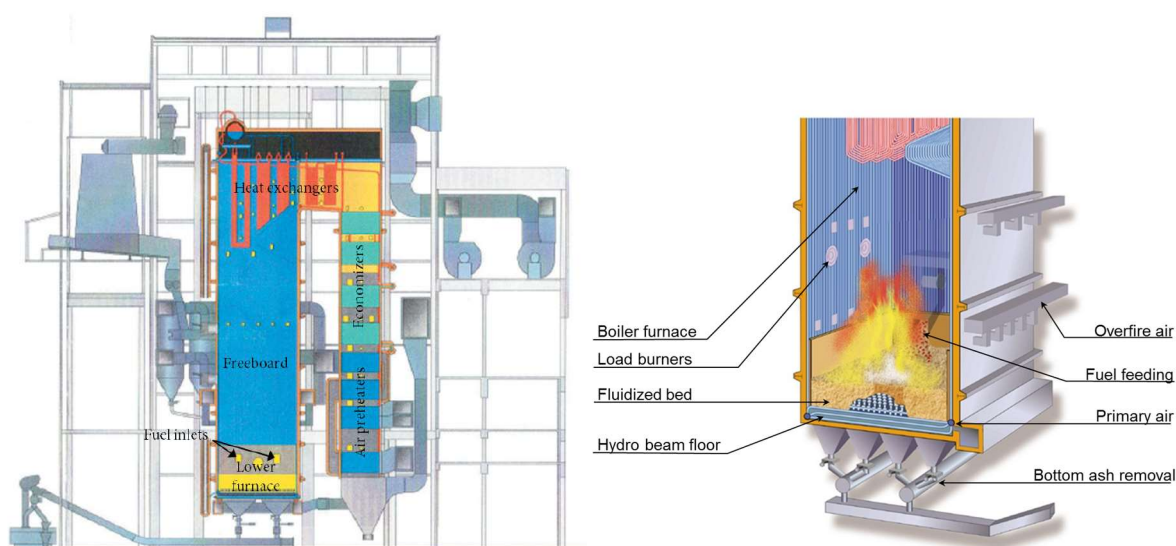
Santos (2009, p. 55-59) mostra que uma instalação de conversão de biomassa equipada com fornalha de leito fluidizado borbulhante é constituída geralmente pelos seguintes elementos:

- Fornalha de leito fluidizado;
- Sistema de injeção de ar fluidização e combustão, respectivo ventilador;
- Sistema de introdução de ar secundário;
- Sistema de comando e controle;

- Placa distribuidora de ar;
- Silos de armazenagem de combustível e respectivo sistema de alimentação;
- Sistema de ignição auxiliar para partida;
- Sistema de extração de cinzas;
- Ventilador e chaminé de extração dos gases de combustão;
- Sistema de ciclones para remoção de partículas.

A Figura 4 mostra uma representação esquemática desse tipo de caldeira.

Figura 4–Corte de uma caldeira de leito fluidizado borbulhante



Fonte: VALMET (2017)

Assim as principais características desse tipo de caldeira são: (SANTOS, 2009, p. 55-59)

- A presença de material inerte em toda a superfície do queimador favorece a íntima e intensa mistura das partículas do leito, com as de combustível e com o ar de combustão. Assim, assegura homogeneidade que garante em toda a secção da fornalha temperatura uniforme, quantidade de oxigênio suficiente e elevada qualidade de combustão;
- O leito possui grande capacidade térmica e intensa transferência de calor para as partículas do combustível garantindo uma ignição instantânea e segura de diversos combustíveis sólidos (mesmo os de difícil queima);

- Possibilidade de queimar vários combustíveis de maneira simultânea ou alternando na mesma caldeira;
- Possibilidade de queimar combustíveis sólidos com até 60% de umidade, teor de cinza de até 70% e baixo Poder Calorífico Inferior (PCI);
- A baixa temperatura de queima da ordem dos 800 a 900°C, geralmente abaixo da temperatura de fusão de cinzas, evita fenômenos de incrustação da superfície de transferência de calor da caldeira;
- Eficiência de queima de até 90% sem recirculação das partículas não queimadas e 98% com a recirculação das mesmas;
- Baixas emissões de SO₂, NO_x e compostos de cloro;
- Reduzida carga térmica de queima por secção de queimador (MWth/m²) quando da queima de combustíveis com alto teor de voláteis;
- Alguma limitação em potências térmicas elevadas devido ao elevado número de pontos de alimentação de combustível necessários;
- Restritiva a variação de carga;
- Ausência de partes móveis internas (menor manutenção se comparadas a tecnologia grelha);
- Custo operacional mais elevado que a tecnologia a grelha;
- Custo de instalação elevado se comparado a tecnologia a grelha.

2.2.3.3 Caldeiras de leito circulante

Macedo (2006, p. 58-59) caracteriza o modo de fluidização das caldeiras de leito fluidizado circulante por uma alta velocidade de arraste entre o gás e os sólidos (combustível e leito) e por extensa mistura destes. Altas velocidades de arraste entre o gás e os sólidos, aumentam as taxas de transferência de calor e conseqüentemente as taxas de oxidação (combustão) e reações de eliminação do enxofre, a intensa e homogênea mistura dos sólidos presentes no leito assegura a mistura dos combustíveis com o ar de combustão, fazendo com que haja reduções de emissões na chaminé.

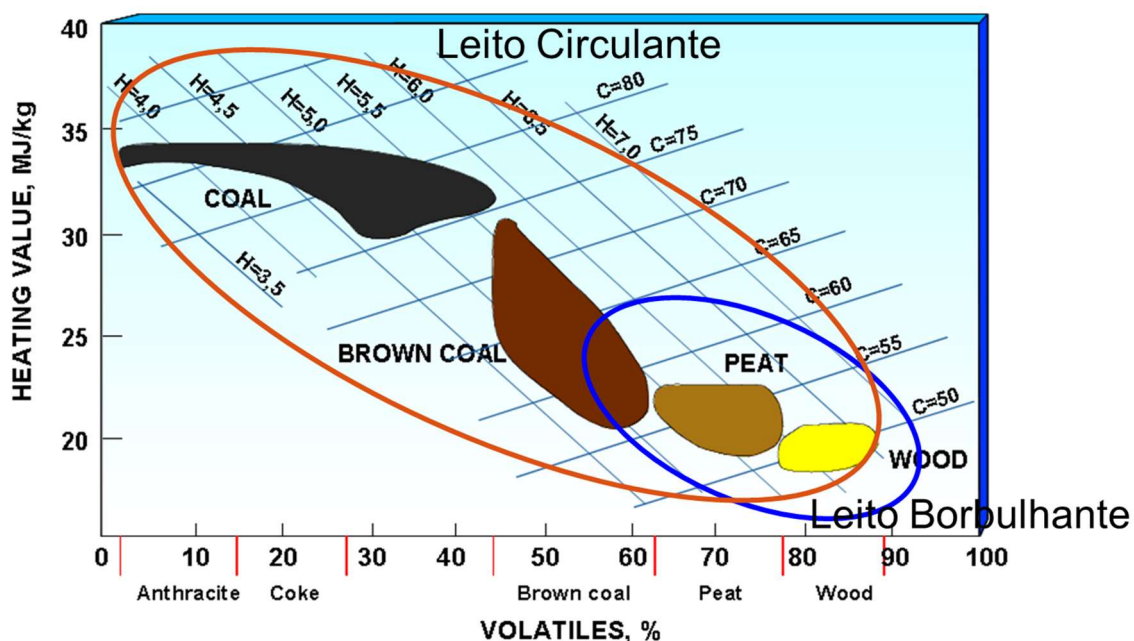
A velocidade do ar é alta, sendo que as partículas de tamanhos médios e finos sejam arrastadas para fora da fornalha e posteriormente sejam separadas do gás de exaustão através de um ciclone. A combustão ocorre na totalidade da fornalha, com

intenso movimento das partículas. As partículas separadas no ciclone são enviadas novamente para a parte inferior do leito, como partícula não queimada, contribuindo para a combustão completa deste material. (MACEDO, 2006, p. 58-59).

Peña (2011, p. 4) comenta que a velocidade do ar para esse tipo de aplicação pode variar entre 4,5 e 6,7 m/s. De acordo com esse autor, esse tipo de caldeira geralmente é utilizada em aplicações de maiores capacidades. As caldeiras de leito circulante têm uma flexibilidade ainda maior do que as de leito borbulhante quanto a queima de vários combustíveis, com maior umidade e com eficiência que pode chegar a 95%.

A ampla variedade de combustíveis que esse modelo de caldeira é capaz de processar pode ser verificada na Figura 5.

Figura 5– Combustíveis para queima em caldeiras de leito fluidizado

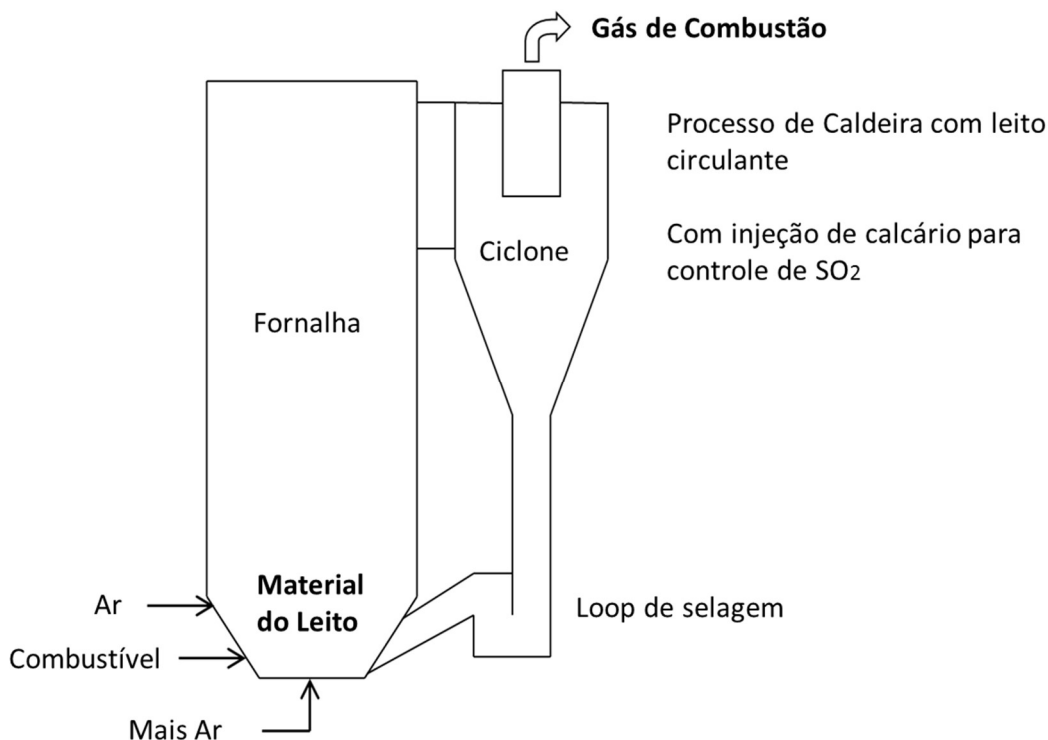


Fonte: VALMET (2007)

A Figura 5 também mostra que caldeiras de leito borbulhante são mais indicadas quando o combustível utilizado apresenta baixo poder calorífico e alta quantidade de voláteis. Já as caldeiras de leito circulante são mais versáteis quanto ao emprego de combustíveis e são recomendadas para combustíveis de alto poder calorífico.

Os principais componentes dessa caldeira são apresentados na Figura 6:

Figura 6—Componentes de uma Caldeira de Leito Circulante



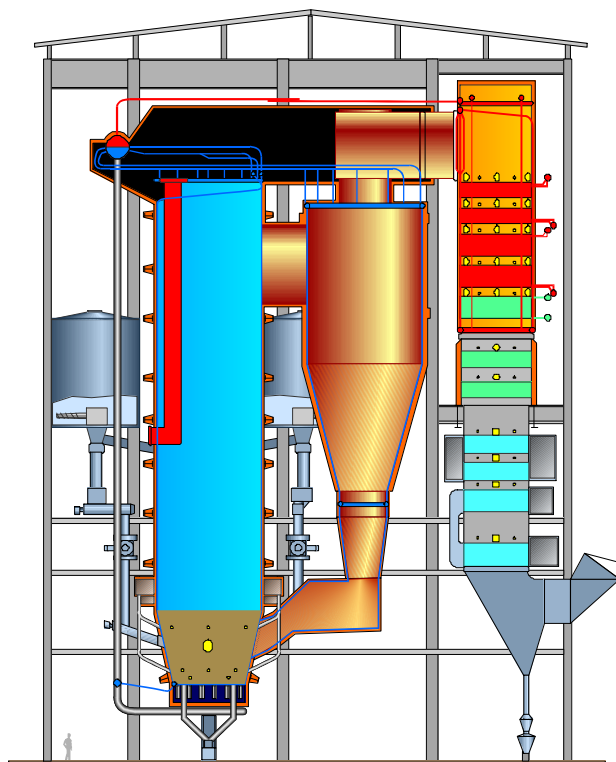
Fonte: VALMET (2017)

Na Figura 6, ar e combustível são alimentados na parede lateral da caldeira. Mais ar é alimentado na parte inferior para fazer o arraste do material do leito (areia e combustível). Todas essas entradas ocorrem na fornalha, mesmo lugar onde ocorre a combustão do combustível. O gás de combustão arrastando o material do leito vai para o ciclone, onde ocorre a separação do gás para fora da caldeira e a recuperação do material sólido do leito para que ele retorne para a fornalha.

O *Biomass Combustion Manual* especifica que esse sistema possui um coeficiente de transferência de calor maior que os demais por causa da maior turbulência provocada pela circulação do leito. Ainda, esse sistema utiliza um excesso de oxigênio, o que contribui para sua maior eficiência energética. No entanto, devido a suas características de funcionamento geralmente a quantidade de particulado no gás de combustão é maior e seu custo de instalação é mais elevado do que as outras tecnologias. Por fim, assim como nas caldeiras de leito borbulhante, combustíveis com alto teor de álcali podem ocasionar aglomeração do leito e, portanto, não devem ser considerados para esse tipo de tecnologia.

Na Figura 7 pode-se encontrar uma representação esquemática em corte desse tipo de caldeira.

Figura 7–Figura em corte de uma caldeira de leito circulante



Fonte: VALMET (2017)

2.3 GASEIFICAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS SÓLIDOS E QUEIMA DO GÁS EM CALDEIRAS

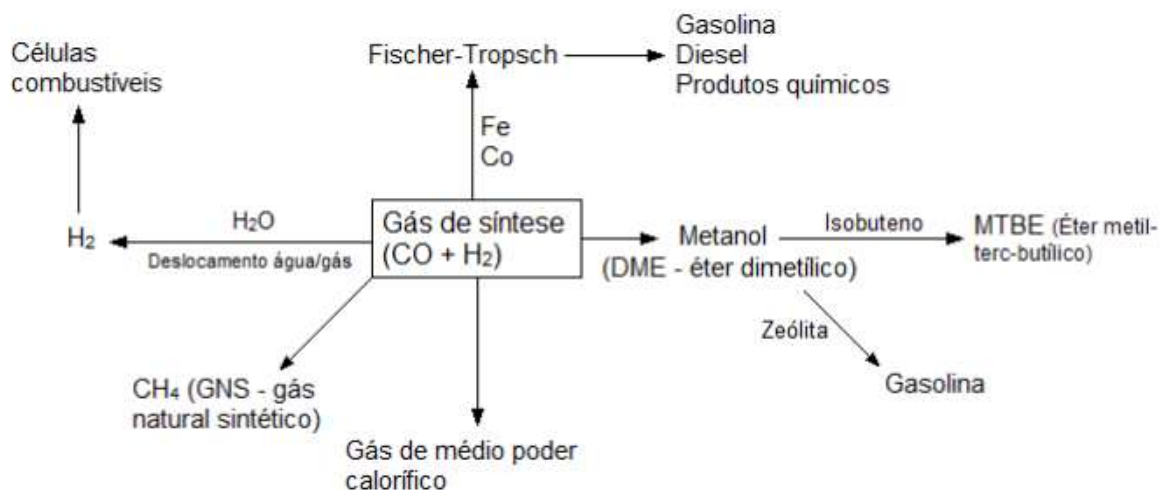
2.3.1 Gaseificação do combustível sólido

A tecnologia de gaseificação tem sido largamente aplicada para produzir químicos e combustíveis. A tendência na indústria tem sido de um crescimento no emprego desse processo para obtenção do gás de síntese (syngas) por dois motivos principais: (LOPES, OKAMURA E YAMAMOTO, 2015, p. 88)

- A gaseificação fornece um gás de alta qualidade (com poder energético e não poluente);
- Grande variedade de materiais podem alimentar o gaseificador.

De fato, Lopes (2014, p. 34) mostra que além de se utilizar o gás de síntese como combustível para caldeiras, existem várias outras aplicações para esse gás conforme Figura 8.

Figura 8 – Usos para o gás de síntese



Fonte: LOPES (2014)

Portanto, uma alternativa a queima de combustível sólido diretamente na fornalha da caldeira, é gaseificá-lo e queimar apenas o gás gerado do processo de gaseificação em uma caldeira aquatubular.

A gaseificação é o processo de conversão da matéria orgânica em gás combustível através de combustão parcial, com uma quantidade de ar menor que a estequiométrica (falta oxigênio se comparada a relação molar da reação química de oxidação), geralmente na presença de vapor, para fornecer energia para conversão térmica da biomassa em gases e vapores orgânicos, para posterior produção de energia. Estes gases podem movimentar turbinas a gás ou fornecer energia para caldeiras (MACEDO, 2006, p. 51).

A gaseificação envolve uma reação química endotérmica (absorve energia) que demanda calor e gera monóxido de carbono (CO), hidrogênio (H₂) e outros compostos. Dependendo do projeto e das condições de operação, o processo também pode gerar metanos e hidrocarbonetos (LOPES, 2014, p. 34).

Assim, a produção de energia envolve a conversão da biomassa em uma atmosfera de vapor ou ar, ou ambos, para produzir um gás de baixo ou médio poder calorífico. Se ar estiver presente, as condições serão menores que as condições

estequiométricas. O gaseificador pode ser classificado de acordo com três condições básicas: o tipo de atmosfera de gaseificação, a pressão interna do gaseificador e o tipo de reator (MACEDO, 2006, p. 51).

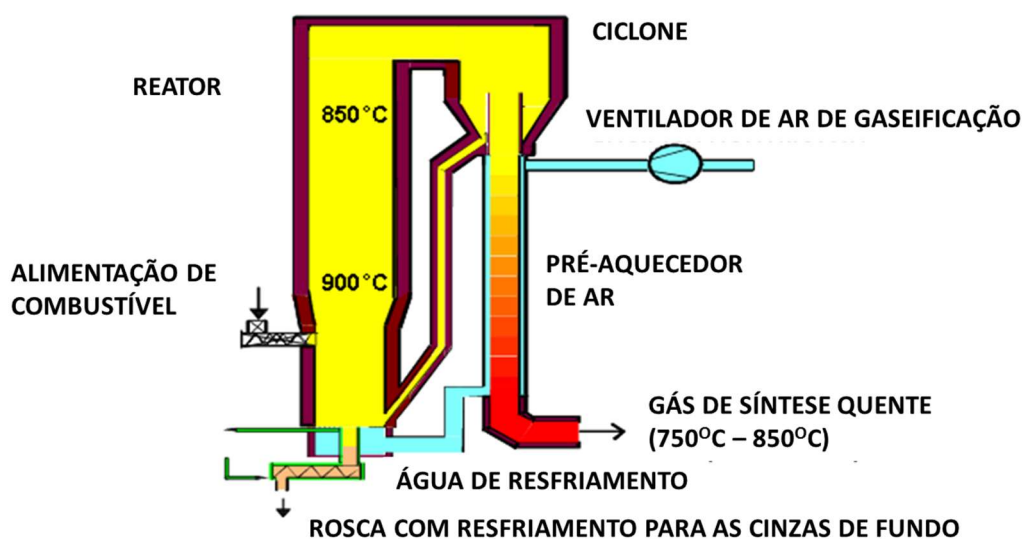
Simplificadamente Godinho (2006, p.6) representa a reação de gaseificação: Combustível + agente de gaseificação (isento ou com limitação de oxigênio) → gás combustível + alcatrão + carvão ou char

Ryckmans e Spiegel (2002) comentam que a gasificação e a queima desses gases gerados (syngas) é também conhecida como co-gaseificação e é uma tecnologia relevante que resulta em alta eficiência do ciclo de vapor devido a qualidade do gás de síntese). O reator de gaseificação opera geralmente entre 800 e 1000 °C dependendo da carga e da composição do combustível.

A circulação do material inerte do leito serve como um “carregador” de calor que estabiliza a temperatura do processo. Lopes (2014, p. 41) em seu trabalho ainda recomenda uma pressão de operação para o reator de 10^5 a $33 \cdot 10^5$ Pa.

O sistema consiste em um reator (gaseificador) onde a gaseificação ocorre, um ciclone para separação do material do leito do syngas e um duto para levar de volta o material circulante para a parte inferior do gaseificador. Esse sistema pode ser visto na Figura 9 (RICKMANS e SPIEGEL, 2002):

Figura 9—Figura em corte de um gaseificador



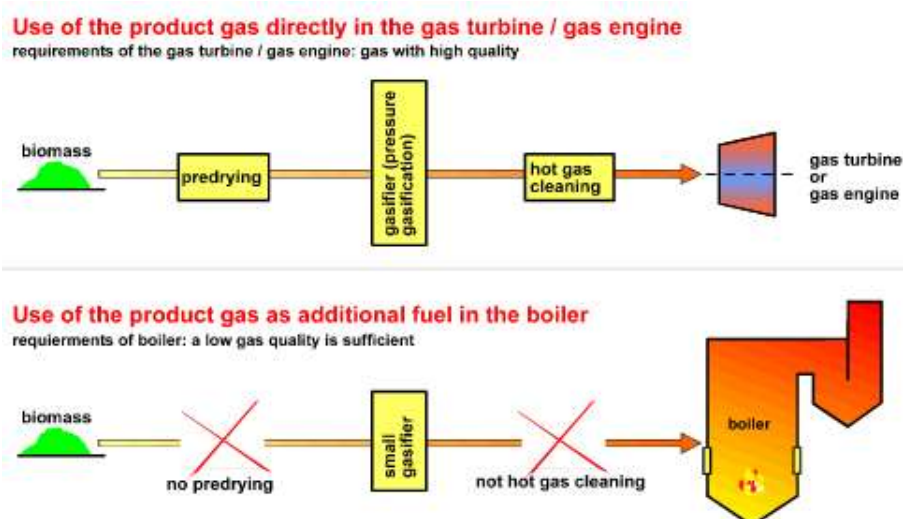
Fonte: RICKMANS e SPIEGEL (2002)

Lopes (2014, p. 41) classifica os gaseificadores de acordo com os seguintes critérios:

- Poder calorífico do gás produzido (baixo – até 5MJ/Nm³; médio – de 5 a 10 MJ/Nm³ ou alto – 10 a 40 MJ/Nm³);
- Tipo de agente gaseificador (ar; vapor; oxigênio ou hidrogênio)
- Direção do movimento do material a ser gaseificado e do agente de gaseificação (contracorrente; concorrente; fluxo cruzado ou leito fluidizado).
- Pressão de operação (pressão atmosférica ou pressurizado – até 6 MP);
- Tipo de material de alimentação (resíduos industriais, resíduos sólidos urbanos, biomassa, etc.)

De acordo com Ryckmans e Spiegel (2002), o gás proveniente da gaseificação precisa ser resfriado até cerca de 750 °C para entrada na caldeira. Para os autores, nos últimos anos devido ao avanço das tecnologias, os combustíveis não precisam ser secos para esse tipo de aplicação, podendo ser utilizados combustíveis com até 60% de umidade. Para um conceito como esse, essa condição é suficiente pois evita que o reator opere a temperaturas mais elevadas que requeiram resfriadores adicionais de gases ou processos de limpeza do syngas. Esta é uma vantagem da queima do syngas na caldeira ao invés de utilizá-lo diretamente em turbinas como se pode verificar na Figura 10:

Figura 10–Comparação entre queima do gás de gaseificação em caldeiras vs turbinas



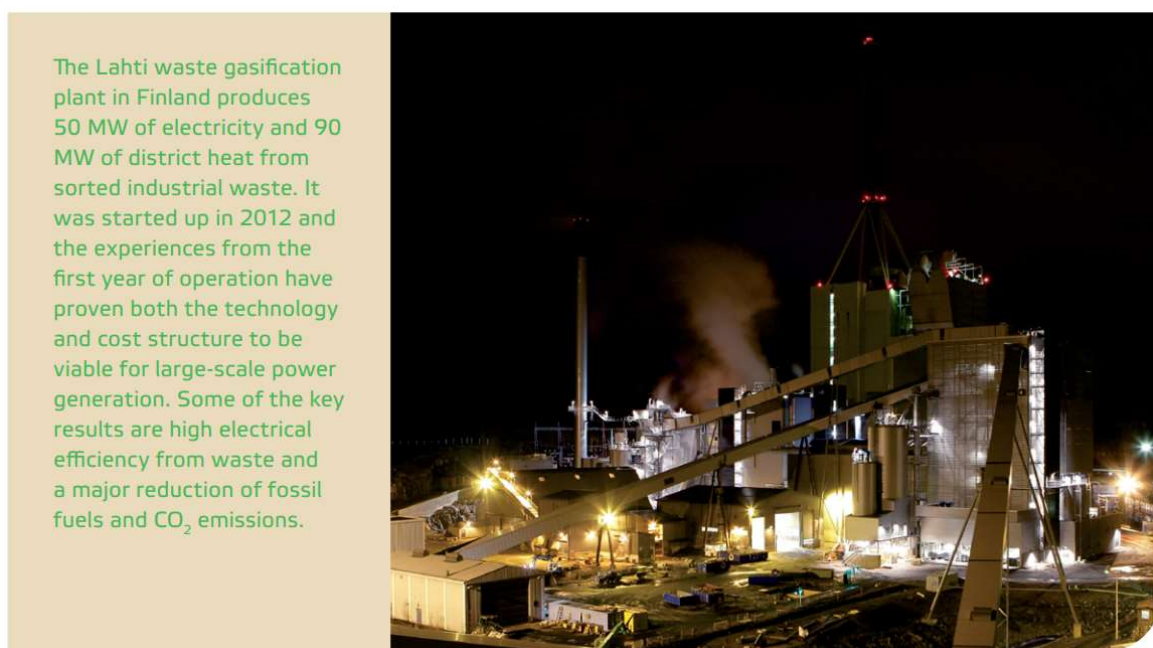
Fonte: RICKMANS e SPIEGEL (2002)

De acordo com Santos, Gulyurtlu e Cabrita (2010, p. 83), as principais vantagens da gaseificação são as seguintes:

- Permanência das cinzas e do carbono residual no gaseificador diminuindo a emissão de partículas;
- Obtenção de combustível resultante limpo.

A Figura 11 mostra uma planta integrada de gaseificação com caldeira em operação na Finlândia.

Figura 11–Planta de gaseificação de resíduos em Lahti - Finlândia



Fonte: VALMET (2017)

Rosa, Chernicharo e Melo (2014, p. 60) compararam as vantagens e desvantagens do processo de gaseificação com a combustão direta do combustível em uma caldeira. Esse estudo foi realizado com lodo de efluentes e suas conclusões podem ser adaptadas para a queima de resíduos sólidos urbanos. A Tabela 3 apresenta uma síntese do estudo desenvolvido pelos referidos autores:

Tabela 3 – Comparação qualitativa entre queima de lodo por diversas tecnologias

Item	Tecnologia	
	Combustão	Gaseificação
Custo de instalação (US\$/kg)	Menor	Maior
Custo de operação/manutenção (US\$/kg)	Menor	Maior
Energia gerada (MJ/kg)	Maior	Menor
Potencial de geração de subprodutos sólidos	Maior	Menor
Potencial de geração de subprodutos líquidos	Menor	Maior
Potencial de geração de subprodutos gasosos	Menor	Maior
Exigências na preparação da matéria-prima para aplicação ao processo térmico	Menor	Maior
Simplicidade operacional	Maior	Menor
Nível de desenvolvimento das pesquisas aplicadas	Maior	Menor
Potencial de emissões atmosféricas (dioxinas, furanos, SOx, NOx e metais pesados)	Maior	Menor

Fonte: Adaptado de ROSA, CHERNICHARO E MELO (2014)

A partir da Tabela 3, pode-se constatar que a combustão direta é mais atrativa no quesito custo de instalação, energia gerada em forma de calor e na não necessidade de preparação da matéria-prima. Essa análise do custo fica válida mesmo com os autores não informando qual o destino do gás de síntese, pois se a gaseificação por si só já apresenta um custo mais elevado se comparado com a combustão direta, adicionar a caldeira para queima do gás de síntese gerado elevaria ainda mais os custos.

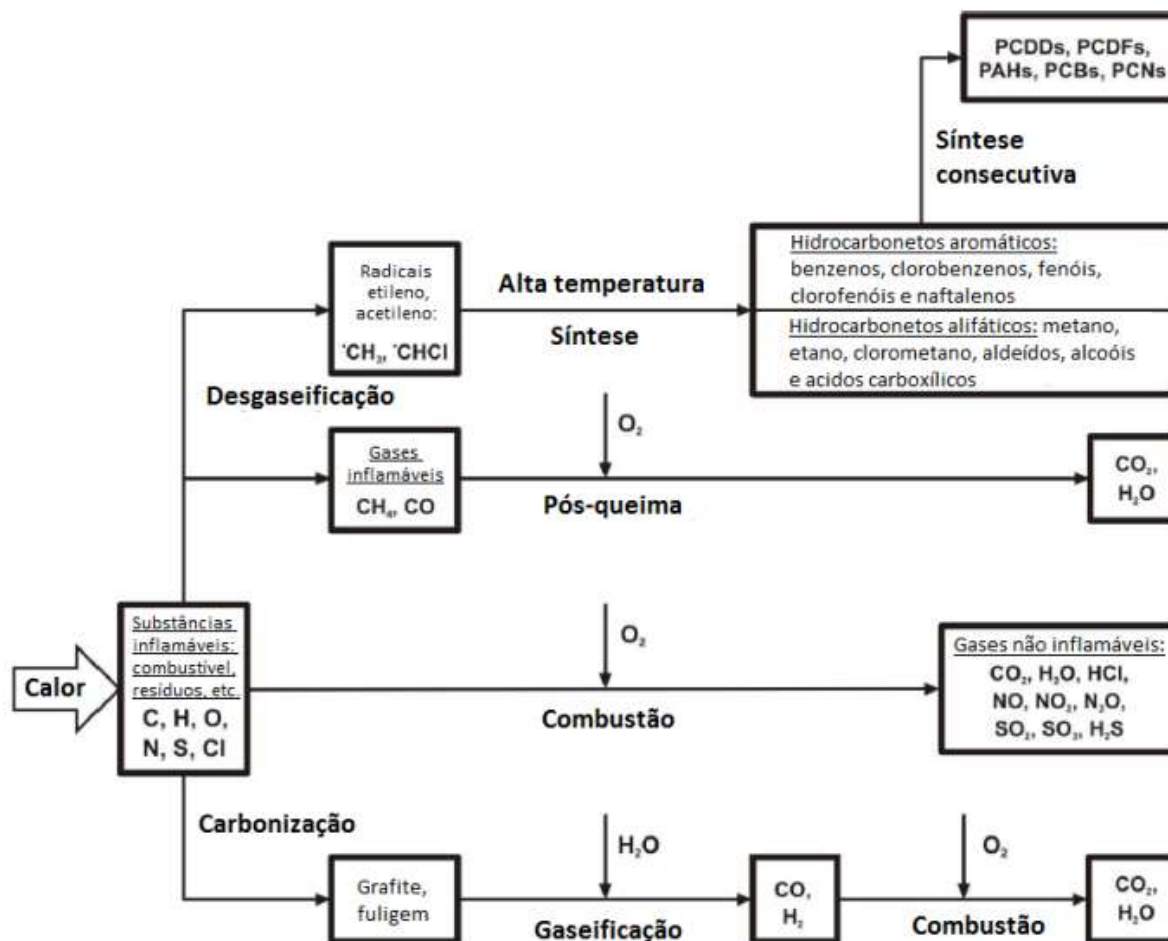
Quando se olha para o lado das emissões, a gaseificação leva clara vantagem (menor geração de resíduos perigosos, menos emissão de dioxinas e furanos e menor emissão esperada de metais pesados).

Essa questão das vantagens da tecnologia de gaseificação frente a combustão direta também é explorada no trabalho de Lopes, como resumido na Figura 12: (LOPES, p. 50, 2014)

Isso pode ser visto da seguinte forma: a parte gasosa do combustível analisado tem dois destinos: síntese de novos compostos ou queima na presença de oxigênio. Já a parte sólida rica em carbono, objeto de estudo mais detalhado nesse trabalho, pode sofrer o processo de combustão, que tem como produto gases como CO₂, água, HCl, NO_x, SO_x e H₂S, ou pode passar pelo processo de gaseificação

gerando o gás de síntese composto por CO e H₂ para posteriormente efetuar a combustão apenas desse gás que liberará como emissão CO₂ e água.

Figura 12 – Diagrama simplificado de formação de poluentes a partir da combustão de resíduos sólidos



Fonte: LOPES (2014)

2.3.2 Pirólise do combustível sólido

A pirólise é a decomposição térmica na ausência de oxigênio e é considerada a primeira etapa dos processos de combustão e gaseificação. A pirólise da biomassa produz gás, líquido e sólido. O líquido de coloração escura é chamado de bio-óleo e o sólido de carvão vegetal (ALMEIDA, 2008, p. 11).

Almeida (2008, p. 11) considera a pirólise rápida para produção de líquidos uma rota bastante atrativa uma vez que o líquido, de maior densidade, pode ser

transportado, e manuseado com maior facilidade e menor custo que o combustível sólido ou gasoso. (ALMEIDA, 2008, p. 11)

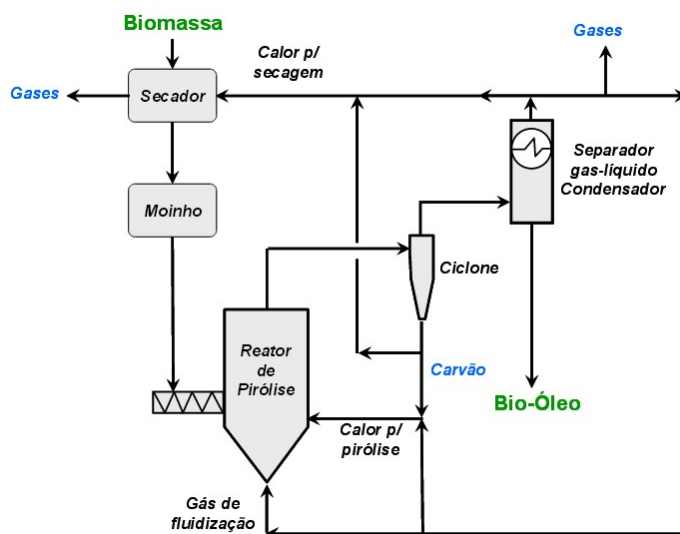
Os principais requerimentos do processo de pirólise rápida são:

- Altas taxas de transferência de calor, requerendo uma biomassa com baixa granulometria.
- Temperatura de reação controlada em torno de 500°C.
- Baixo tempo de residência dos vapores, tipicamente menor que 2s.
- Resfriamento rápido dos vapores.

Assim, o processo de pirólise rápida compreende uma etapa de secagem da biomassa, tipicamente para menos de 10% de umidade, para minimizar a quantidade de água no produto líquido, moagem da biomassa para obter tamanho de partículas suficientemente pequeno, em torno de 2mm para leito fluidizado, reação de pirólise, separação do carvão dos gases e vapores e condensação rápida dos vapores e coleta do bio-óleo. A Figura 13 mostra esse processo (ALMEIDA, 2008, p. 12-13).

Devido a falta de referências comerciais da pirólise para geração de bio-óleo a partir de RSU's e posterior queima do bio-óleo em caldeiras aquatubulares, o foco do presente trabalho permaneceu limitado aos processos de combustão direta do RSU e de gaseificação com posterior queima do gás de síntese em caldeira a gás.

Figura 13 – Processo de pirólise para obtenção de bio-óleo



FONTE: ALMEIDA (2008)

2.3.3 Queima do Gás de Síntese na Caldeira

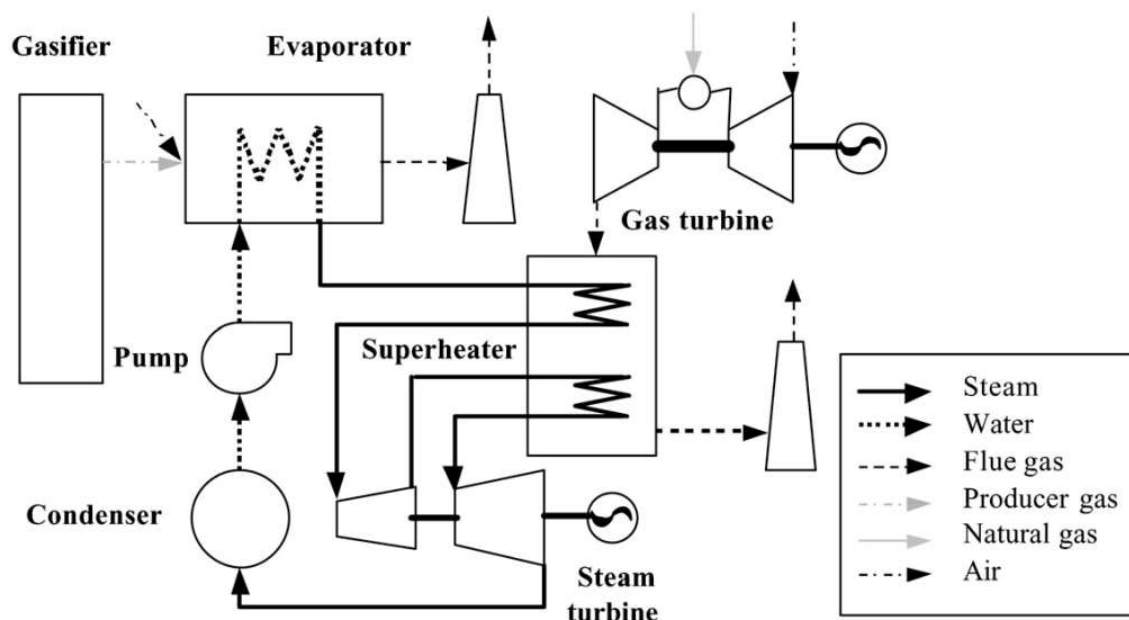
De acordo com Oliveira (2015, p. 17), um uso do gás de síntese é a substituição do gás natural em caldeiras para geração de vapor que movimentará turbinas para geração de potência.

Belgiorno *et. al.* (2002, p. 6) comentam que a integração da gaseificação com plantas termoelétricas é chamada de “*co-firing*” e permite um aumento de performance (se comparado ao uso do gás de síntese para movimentação de turbinas a gás) por se utilizar da alta eficiência típica do ciclo de vapor em plantas termoelétricas.

Para o autor, existem duas possíveis configurações para se realizar essa queima do gás de síntese em caldeiras: realizar a queima em uma caldeira nova apenas para evaporação da água (nesse caso o gás de síntese por si só não conseguiria dar energia suficiente para superaquecer o vapor ou caso fosse utilizado a altas temperaturas poderia corroer os superaquecedores da caldeira) ou queimar o gás de síntese em uma caldeira existente junto ao combustível primário. (BELGIORNO *et. al.*, 2002, p. 6)

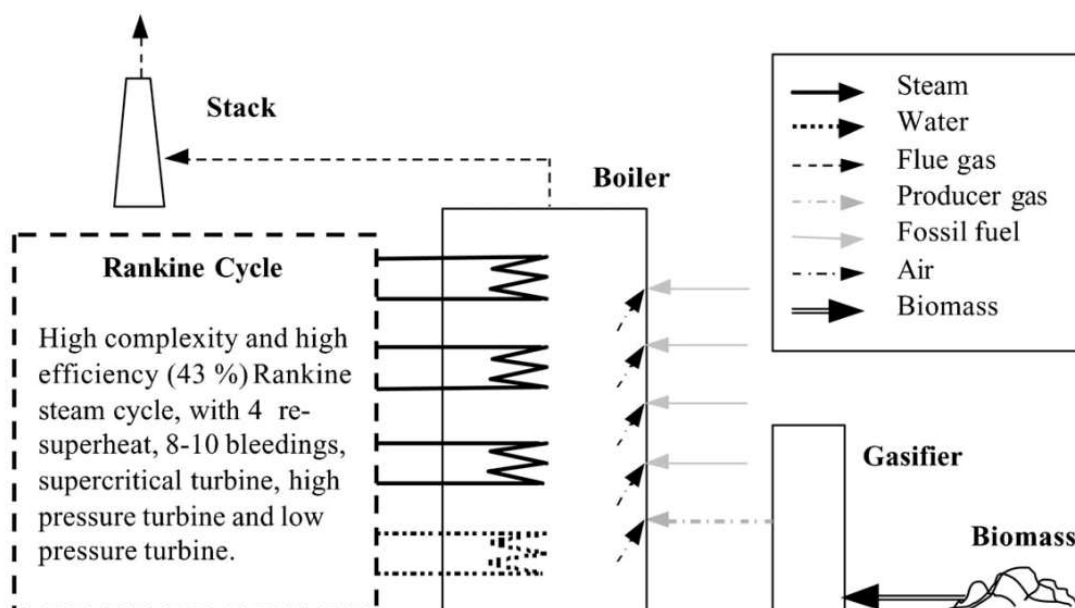
Essas duas configurações podem ser vistas nas Figura 14 e Figura 15:

Figura 14 – Queima do gás de síntese em duas caldeiras separadas



Fonte: BELGIORNO *et. al.* (2002)

Figura 15 – Queima do gás de síntese em apenas uma caldeira com combustível auxiliar



Fonte: BELGIORNO *et. al.* (2002)

É possível se utilizar apenas uma caldeira para queima do gás de síntese, caso se invista no tratamento do gás antes da caldeira para remoção do ácido clorídrico e em materiais especiais para os superaquecedores da caldeira. Esse tratamento pode ser evitado caso o combustível alimentado no gaseificador possua baixo índice de cloro (alta alcalinidade) (BELGIORNO *et. al.*, 2002, p. 6).

Hofbauer, Rauch e Ripfel-Nitsche (2007, p. 64) mostram que essa “limpeza” do ácido clorídrico pode ser feita alimentando a corrente de gás em um reator com sorventes a base de sódio (Na). Para os autores existem ainda métodos que podem ser aplicados para remoção de SOx e NOx do gás de síntese antes de sua combustão na caldeira.

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 O STATUS DOS RESÍDUOS URBANOS SÓLIDOS E DA GERAÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DELES NO BRASIL

3.1.1 Geração e coleta de resíduos sólidos urbanos no Brasil

De acordo com o Panorama dos Resíduos Sólidos Brasileiros divulgado pela ABRELPE (Associação brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais), no ano de 2015 foram gerados 79,9 milhões de toneladas de resíduos sólidos urbanos (RSU). Deste número cerca de 72,5 milhões de toneladas (90,8%) foram coletados (ABRELPE, 2016, p. 18).

A Tabela 4 que traz a quantidade de RSU que é coletada em toneladas por dia em cada região do Brasil.

Tabela 4 - Quantidade de RSU coletada por regiões e Brasil

Regiões	2014	2015	
	RSU Total (t/dia)	Equação*	RSU Total (t/dia)
Norte	12.458	$RSU = 0,000283 (\text{pop tot} / 1000) + 0,614564$	12.692
Nordeste	43.330	$RSU = 0,000105 (\text{pop tot} / 1000) + 0,738735$	43.894
Centro-Oeste	15.826	$RSU = 0,000145 (\text{pop tot} / 1000) + 0,903690$	16.217
Sudeste	102.572	$RSU = 0,000144 (\text{pop tot} / 1000) + 0,873613$	104.631
Sul	21.047	$RSU = 0,000070 (\text{pop tot} / 1000) + 0,685906$	21.316
Brasil	195.233		198.750

Fonte: Panorama dos Resíduos Sólidos Brasileiros 2015 – ABRELPE (2015)

O referido panorama mostra o número de municípios brasileiros que apresentam pelo menos alguma iniciativa de coleta seletiva de resíduos sólidos urbanos. O Gráfico 1 apresenta essa análise em termos percentuais.

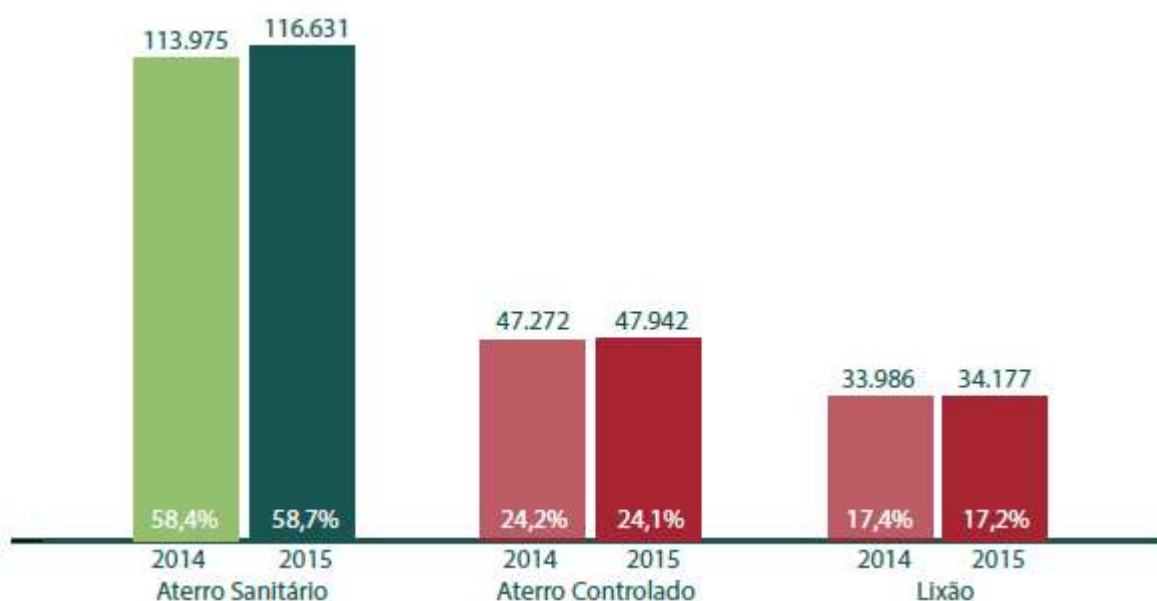
Gráfico 1 - Análise dos municípios que possuem iniciativa de coleta seletiva no Brasil



Fonte: Panorama dos Resíduos Sólidos Brasileiros 2015 – ABRELPE (2015)

O estudo trouxe também o status da destinação desses resíduos urbanos gerados no Brasil. Um compilado dessas informações pode ser encontrado no Gráfico 2.

Gráfico 2 - Disposição final de RSU no Brasil por tipo de destinação (ton/dia)



Fonte: Panorama dos Resíduos Sólidos Brasileiros 2015 – ABRELPE (2015)

Para correto entendimento do Gráfico 2, deve-se levar em conta as seguintes definições, de acordo com o Almanaque Brasil Socioambiental preparado pelo Instituto Socioambiental: (ISA, 2007, p. 403)

- Aterro Sanitário: terrenos impermeabilizados, recobertos por terra compactada, possui dispositivos de drenagem de água, captação e tratamento do chorume. Também capta e trata os gases provenientes da decomposição do lixo;

- Aterro Controlado: terrenos que passaram por algum tipo de tratamento técnico para adequação parcial às normas de engenharia. Normalmente não dispõe de impermeabilização total do terreno, nem sistemas de tratamento de chorume e nem do biogás.;
- Lixão: o resíduo é simplesmente deixado a solo e a céu abertos sem atender a nenhuma norma de controle.

3.1.2 Composição dos Resíduos Sólidos Urbanos Brasileiros

O Instituto de Pesquisas Econômicas Aplicadas (IPEA) realizou uma estimativa da composição dos resíduos sólidos urbanos coletados no Brasil através da média simples da composição gravimétrica de resíduos gerados de 93 municípios brasileiros, pesquisados entre 1995 e 2008. A compilação desses dados é apresentada na Tabela 5:

Tabela 5 - Estimativa da composição gravimétrica dos resíduos sólidos coletados no Brasil

Materiais	Participação %	Quantidade	
		2000 t/dia	2008 t/dia
Metais	2,9	4.301,5	5.293,5
Papel, papelão e tetrapak	13,1	19.499,9	23.997,4
Plástico	13,5	20.191,1	24.847,9
Vidro	2,4	3.566,1	4.388,6
Matéria orgânica	51,4	76.634,5	94.309,5
Outros	16,7	24.880,5	30.618,9
Total coletado	100,0	149.094,3	183.481,5

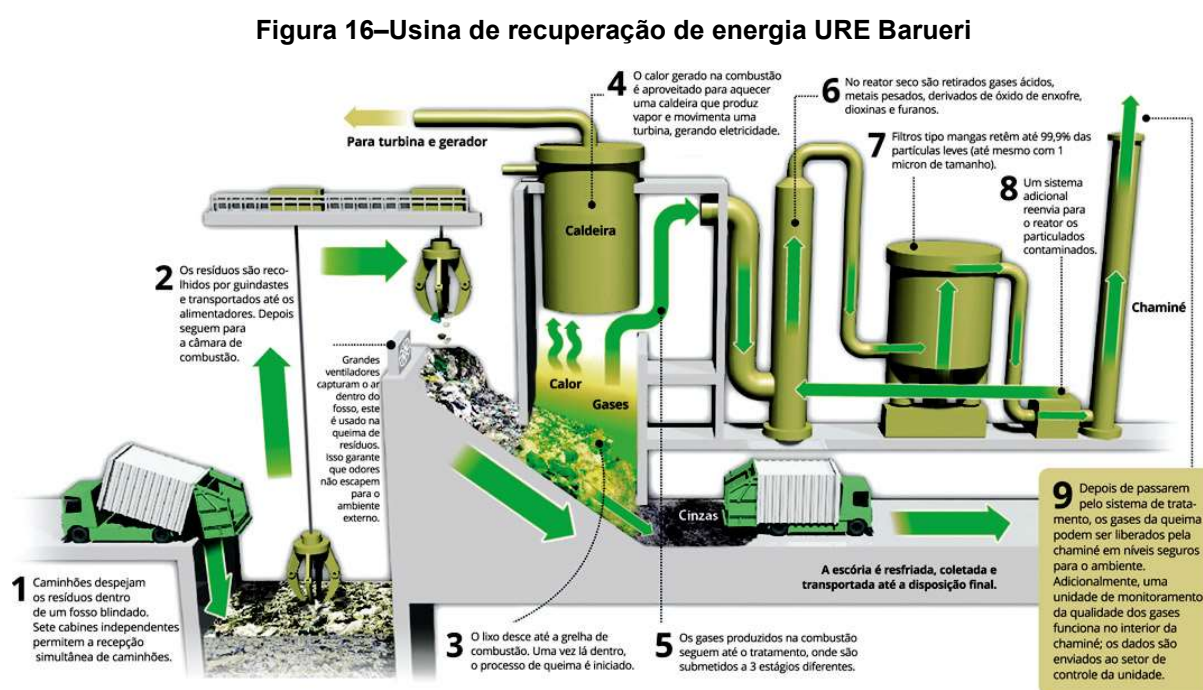
Fonte: Diagnóstico dos Resíduos Sólidos Urbanos - IPEA (2012)

A partir da Tabela 5, pode-se verificar que os resíduos sólidos urbanos são compostos basicamente de material que, pela classificação apresentada no capítulo 2.1.2, são biogênicos (mais do que 64,5%) e uma baixa quantidade de materiais não-combustíveis (vidros e metais representam cerca de 5,3% do total).

A composição dos resíduos sólidos urbanos, portanto, é também considerada úmida devida a alta presença de material orgânico, e heterogênea devido à variedade em sua composição.

3.1.3 Geração de Energia em Caldeiras com Resíduos Sólidos no Brasil

Segundo o site da URE Barueri, até maio de 2017 o Brasil possui apenas uma unidade de recuperação de resíduos sólidos que se encontra em construção e atenderá três municípios da região de Barueri. Na Figura 16 pode-se verificar como se dará o funcionamento dessa usina que está prevista para entrar em operação dentro do ano de 2017. A tecnologia empregada é a caldeira a grelha (URE BARUERI, 2017).



Fonte: <http://www.urebarueri.com.br> (2017)

De acordo com Rossi (2014, p. 21), essa unidade será capaz de incinerar cerca de 825 t/dia de resíduos sólidos urbanos, os quais passarão por uma grelha a 850 °C desenvolvida exclusivamente para tratar RSU brasileiro (alto teor de umidade e grande heterogeneidade), tendo uma potência nominal de 17 MW para a geração de energia elétrica, sendo 13% utilizada na própria usina e 87% exportada para o Sistema Integrado Nacional, por meio de uma linha de transmissão de 88/138 kV.

3.2 COMPARAÇÃO ENTRE AS PRINCIPAIS TECNOLOGIAS INDUSTRIAIS PARA QUEIMA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM CALDEIRAS AQUATUBULARES

A partir das informações levantadas no capítulo 2.2 e 2.3, a Tabela 6 foi criada para comparar as principais tecnologias de queima de resíduos sólidos em caldeiras aquatubulares.

Tabela 6–Tabela comparativa de tecnologias

Característica	Combustão Direta na Caldeira	Gaseificação Associado a Queima do Gás em Caldeiras
Investimento	Menor investimento	Maior investimento
Custo de Manutenção e operação	Menor custo	Maior custo.
Capacidades aplicadas	Todas as faixas	Viável para grandes capacidades
Produção de eletricidade considerando os mesmos parâmetros de vapor	Maior produção	Menor produção
Parâmetros de vapor que podem ser atingidos (Pressão e temperatura)	Menos elevados	Mais elevados
Flexibilidade de combustíveis	Menor	Maior
Umidade do combustível	Opera com alta umidade	Necessita secagem prévia
Emissões Atmosféricas de NOx	Maior	Menor
Emissões Atmosféricas de SOx	Maior	Menor
Emissões Atmosféricas de Particulado	Maior	Menor

Fonte: Dados da pesquisa

A análise apresentada na Tabela 6 demonstra que a escolha da tecnologia a ser empregada depende de vários fatores: drive de investimento (maior retorno financeiro ou menor tempo para retorno do capital), composição do resíduo sólido, disponibilidade de resíduo e conseqüente capacidade da planta e emissões atmosféricas permitidas.

Nos itens de investimento e custos de manutenção e operação da Tabela 6, foram levadas em consideração as análises feitas por Rosa, Cherchinaro e Melo (2014) e o número de equipamentos necessários a partir de toda a pesquisa realizada sobre os sistemas. Fica claro que quando se utiliza a gaseificação, o número de equipamentos utilizados é consideravelmente maior, portanto o investimento inicial e os gastos com a manutenção dos equipamentos e a operação dos mesmos são maiores. Esse alto investimento em equipamentos e a análise efetuada no trabalho de Rickmans e Spiegel (2002) também leva à conclusão de que a tecnologia de *co-firing* (gerar gás de síntese e queimá-lo em uma caldeira) é mais apropriada para maiores capacidades de processamento. Ao contrário da combustão direta, onde as características de uma caldeira a grelha poderiam permitir um processamento de baixas quantidades conforme descrito por Teir (2002).

A Tabela 3 foi utilizada também para realizar a análise da produção de eletricidade. É a partir daí que se chegou à conclusão que a combustão direta tem vantagens na geração da energia elétrica baseando-se em geração de energia (MJ) por quilograma de combustível alimentado. Isso se deve ao fato de a combustão direta apresentar menos processos que a gaseificação, visto que apenas transforma o combustível em energia. A gaseificação transforma o resíduo em gás (parte da energia é perdida nessa transformação) e esse gás então é transformado em energia.

Quanto a flexibilidade no uso de combustíveis pelas tecnologias analisadas, o gaseificador é um equipamento que possui capacidade de trabalhar com grande variedade, conforme análise realizada por Lopes, Okamura e Yamamoto (2015). Já para a combustão direta essa flexibilidade depende muito do tipo de caldeira que se está considerando, conforme descrito por Peña (2011) e apresentado na Figura 5.

Um outro parâmetro importante de análise é a umidade do combustível. Estudos de vários autores como Macedo (2006), Santos (2009) e Peña (2011), mostram que as caldeiras para combustão direta conseguem operar com combustíveis com altos índices de umidade e baixo poder calorífico. Já o gaseificador, pela análise feita por Rickmans e Spiegel (2002), pode trabalhar apenas com

umidades menores que 60%, necessitando da instalação de um secador caso o combustível tenha umidades mais elevadas. Já a análise de emissões de SO_x, NO_x e particulados, foi realizada a partir das informações compiladas por Rosa, Chernicharo e Melo (2015) na Tabela 5 e por Lopes (2015) na Figura 12. De fato, Hofbauer, Rauch e Ripfel-Nitsche (2007) também demonstram que, caso necessário por conta de restrições maiores que as usuais nos índices de emissão, o gás de síntese pode passar por diversos tratamentos para remoção de SO_x, NO_x e cloretos antes de sua combustão na caldeira.

3.2.1 Comparação das Tecnologias Face ao Cenário Brasileiro

A análise da Tabela 6 e das informações sobre os resíduos sólidos brasileiros apresentadas no capítulo 3.1.2 permite as seguintes considerações:

- O cenário de instabilidade e baixo investimento que o Brasil atravessa favorece as tecnologias de combustão direta (especialmente a com caldeira a grelha) por apresentar um custo de investimento e custo operacional menores que a gaseificação;
- Próximos a grandes e médios centros urbanos, onde os resíduos sólidos acumulam nos lixões e necessitam ser processados a um ritmo elevado, as tecnologias de combustão direta em leitos fluidizados e gaseificação se tornam mais atrativas por serem aplicadas em plantas com maior capacidade;
- A heterogeneidade do resíduo sólido brasileiro, conforme apresentado na Tabela 5, favorece as tecnologias de gaseificação e limitam as possibilidades de combustão direta dos resíduos no estado sólido;
- A alta umidade dos resíduos sólidos urbanos brasileiros e o relativo baixo poder calorífico, conforme constatado na Tabela 2 e na Tabela 5, favorecem as tecnologias de combustão direta e podem encarecer ainda mais a alternativa da gaseificação em virtude da necessidade de secagem do resíduo.
- Para lugares no Brasil onde as legislações ambientais são mais rígidas (os estados têm possibilidade de adotar limites mais rígidos de emissão do que os regulados pelo governo federal) ou existe pressão da

comunidade (principalmente dentro de centros urbanos), a tecnologia de gaseificação e, em alguns casos o pré-tratamento do gás de síntese, é a mais recomendada.

As considerações anteriores mostram indicativos para escolha de soluções para padrões típicos brasileiros. Mas vale notar que na seleção da tecnologia cada caso é especial e deverá ser analisado em conjunto com o local onde a usina será instalada, o combustível disponível, o tamanho do investimento que o investidor esteja disposto a fazer e a legislação específica da localidade.

4 CONCLUSÃO

O cenário atual de geração de resíduos urbanos e de energia do lixo no Brasil foi estudado sendo constatado que hoje gera-se cerca de 198.750 toneladas de resíduos por dia no Brasil e existe apenas uma unidade para queima de lixo em caldeiras que está em fase de construção em Barueri. O resíduo urbano brasileiro tem composição heterogênea e de umidade elevada, sendo composto principalmente por matéria orgânica, plástico, papel e papelão.

Foram descritas as principais tecnologias comerciais para queima direta de resíduos sólidos urbanos em caldeiras: a tecnologia de caldeira a grelha, de leito fluidizado borbulhante e a de leito fluidizado circulante. Também foi descrito o processo de gaseificação e da posterior queima do gás de síntese em caldeiras aquatubulares.

Por fim, foram analisadas as tecnologias de queima direta e gaseificação aplicadas ao cenário brasileiro e constatou-se que as tecnologias de queima direta se adaptam melhor a cenários de menor capital para investimento e resíduos com maior umidade (características presentes nos resíduos brasileiros). No entanto, em locais onde os limites de emissões atmosféricas são mais restritivos, as tecnologias de gaseificação são as mais adequadas.

A comparação das tecnologias de combustão direta e gaseificação para o uso de resíduos sólidos urbanos brasileiros para geração de eletricidade via uso de vapor superaquecido proveniente de caldeiras aquatubulares nos levou, portanto, a conclusão que cada tecnologia possui vantagens e desvantagens mesmo se analisadas dentro do cenário brasileiro e a escolha da mais adequada depende das características do projeto único em termos de disponibilidade e composição do resíduo, o montante financeiro que pode ser gasto no projeto e dos limites de poluentes que podem ser emitidos para atmosfera.

REFERÊNCIAS

- ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação**. Rio de Janeiro, 1987.
- ABRELPE (Associação brasileira de Empresas de Limpeza Pública e resíduos Especiais). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2015**. São Paulo, 2016.
- ALMEIDA, M. B. B. **Bio-Óleo a partir da Pirólise Rápida, Térmica ou Catalítica, da Palha da Cana-de-açúcar e seu Co-processamento com Gasóleo em Craqueamento Catalítico**. 2008. 167 f. Tese (Mestrado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008.
- BELGIORNO, V., DE FEO, G., DELLA ROCCA, C., NAPOLI, R. M. A. **Energy from Gaseification of Solid Wastes**. Fisciano (Itália). 2012.
- Energy Department of US. **Methodology for Allocating Municipal Solid Waste to Biogenic and Non-Biogenic Energy**. Washington, 2007.
- Environmental Protection Agency (EPA) – Estados Unidos. **Nitrogen Oxides (NOx), Why and How They Are Controlled**. 57 f. Carolina do Norte (USA). 1999.
- EPE (Empresa de Pesquisa Energética). **Balanco Energético Nacional 2016**. Rio de Janeiro, 2016.
- GERHARDT, T. E., SILVEIRA, D. T. **Métodos de Pesquisa**. 1. ed. Porto Alegre: UFRGS, 2009.
- GIL A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.
- GODINHO, M. **Gaseificação e Combustão de resíduos Sólidos da indústria Calçadista**. 2006. 106 f. Dissertação (doutorado) – UFRGS, Escola de Engenharia, 2006
- HOFBAUER, H., RAUCH, R., RIPPEN-NITSCHKE, K. **Report on Gas Cleaning for Synthesis Applications**. University of Technology of Vienna. Viena (Itália). 2007.
- ISA (Instituto Socioambiental). **Almanaque Brasil Socioambiental**. São Paulo, 2007.
- LOPES, E. J., OKAMURA, L. A., YAMAMOTO, C. I. **Formation of Dioxins and Furans During Municipal Solid Waste Gasification**. Brazilian Journal of Chemical Engineering, Curitiba, v. 32, n. 1, p. 87-97, 2015.
- MACEDO, J. C. F. **Análise Térmica e Ambiental da queima do Lodo Primário da Fabricação de Papel e Celulose em Caldeira de Biomassa à Grelha**. 2006. 216 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Itajubá, 2006.
- Ministry of New and Renewable Energy - India. **Biomass Combustion Manual**. 12 f. Nova Deli (IN). 2015.

MTE (Ministério do Trabalho e Emprego). **NR-13: Caldeiras Vasos de Pressão e Tubulações**. Brasília, 2014.

NASCIMENTO, M. D. **Otimização do Uso de Lenha e Cavaco de Madeira para Produção de Energia em Agroindústria Seropédica**. 2007. 90 f. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrônômicas de Botucatu, 2007

OLIVEIRA, C. A. V. B. S. **Estudo experimental da gaseificação do eucalipto em gaseificador co-corrente de duplo estágio com ar, vapor saturado e oxigênio para produção de gás de síntese**. 2015. 159 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2015.

PEÑA, J. A. P. **Bubbling Fluidized Bed (BFB), When to use this technology?** In: IFSA (Industrial Fluidization South Africa), 2011, Joanesburgo África do Sul. Foster Wheeler Global Power Group. Madrid. 2011.

POLI, D. C. R., ZANCHETA, M. N., BOARI, Z. M., MELDONIAN, N. L., MOURA, C. L., JIURGIU, P. A. **Uma Avaliação das Metodologias para Determinação do poder Calorífico dos resíduos Sólidos Urbanos**. Revista de Ciências Exatas e Tecnologia, Osasco (SP), v. 8, n. 8, p. 9-31, jun.2014.

RODRIGUES, L. D., SILVA, I. T., ROCHA, B. R. P. et al. **Uso de briquetes compostos para produção de energia no estado do Pará**. Campinas (SP), 2002.

ROSA, A. P., CHERNICHARO C. A. L., MELO, G. C. B. **Contribuição para o Aproveitamento Energético do Lodo de ETEs em Processos Térmicos**. Revista DAE SABESP, São Paulo, v. 62, n. 198, p. 55-62, jan.2015.

ROSSI, C.R. **Potencial de Recuperação Energética dos Resíduos Sólidos Urbanos na Região da Amesc**. 2014. 28 f. Dissertação (graduação) – UFSC, 2014

RYCKMANS, Y., VAN DEN SPIEGEL, F. **Biomass Gasification and Use of Syngas as an Alternative Fuel in a Belgian Coal-Fired Boiler**. In: Conference on New and Renewable Energy Technologies for Sustainable Development, 2002, Açores (PT).

SANTOS, D., GULYURTLU I., CABRITA, I. **Materiais e energia. Conversão Termoquímica de Combustíveis**. Revista Corrosão e Proteção de Materiais. Lisboa, v. 29, n. 3, p. 78-90, 2010.

SANTOS, P. G. C. **Desenvolvimento de um Queimador em leito Fluidizado Borbulhante para Queima de Biomassa. Adaptação a Caldeira Pré-existente**. 2009. 159 f. Dissertação (mestrado) –Universidade do Porto, Faculdade de Engenharia, 2009

SINIR (Sistema Nacional de Informações Sobre a Gestão de Resíduos Sólidos). **Resíduos Sólidos Urbanos**. Disponível em: < sinir.gov.br/web/residuos-solidos-urbanos>. Acesso em: 11jun. 2017

Spirax Sarco Limited. **Steam and Condensate Loop**. Cheltenham (UK), 2008.

TEIR, S. **Modern Boiler Types and Applications**. Helsinki University of Technology. Espoo (FN), 2002.

URE Barueri. **Unidade de Recuperação Energética de Barueri**. Disponível em: <<http://www.urebarueri.com.br>>. Acesso em 16 mai. 17.

Valmet Technology Oy. **Gasification for Biomass and Waste**. Disponível em: <<http://www.valmet.com/energyproduction/gasification/>>. Acesso em: 11jun. 2017