



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS E ESCOLA DE ENGENHARIA
CURSO DE ENGENHARIA AMBIENTAL**

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UMA CÂMARA DE PÓS-COMBUSTÃO

IGOR BUENO ARNOLD

Porto Alegre, RS, Brasil

Dezembro de 2012

IGOR BUENO ARNOLD

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UMA CÂMARA DE PÓS-COMBUSTÃO

TRABALHO DE CONCLUSÃO
APRESENTADO AO CURSO DE
ENGENHARIA AMBIENTAL DA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO
GRANDE DO SUL COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE ENGENHEIRO AMBIENTAL.

Orientador: André Rodrigues Muniz

Co-Orientador: Cleiton Bittencourt da Porciúncula

IGOR BUENO ARNOLD

SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UMA CÂMARA DE PÓS-COMBUSTÃO

Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul defendido e aprovado em **08/01/2013** pela Comissão avaliadora constituída pelos professores:

Banca Examinadora:

.....
Orientador
Prof. Dr. André Rodrigues Muniz - Departamento de Engenharia Química - UFRGS

.....
MSc. Roberto Peres Campello – Departamento de Engenharia de Processos da
empresa Luftech Soluções Ambientais LTDA

.....
Prof. Dr. Nilson Romeu Marcilio – Departamento de Engenharia Química - UFRGS

Conceito:.....

DEDICAÇÃO

Dedico este trabalho aos meus pais, Elza e Roberto Arnold, que mesmo nos momentos mais difíceis, sempre me estenderam a mão.

AGRADECIMENTOS

À família, por toda consideração, abdições e apoio desprendidos, para que eu completasse esta jornada.

Às coisas simples que me fazem sorrir.

Ao André Muniz, por acreditar na minha ideia.

Ao Cleiton Bittencourt, por tornar a minha ideia possível.

À Luftech Soluções Ambientais Ltda, pelo crédito em mim depositado.

A felicidade é um bem que se multiplica ao ser dividido.

MARXWELL MALTZ

RESUMO

ARNOLD, IGOR BUENO. Simulação numérica de uma câmara de pós-combustão. 2012. 54 f. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Ambiental) - Instituto de Pesquisas Hidráulicas e Escola de Engenharia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

A incineração é uma alternativa de tratamento para os resíduos sólidos, em especial àqueles que apresentam riscos biológicos e químicos. Porém a ela existe uma preocupação associada que é a poluição gerada pelas emissões atmosféricas, que podem ser minimizadas através da otimização dos equipamentos responsáveis pela queima, buscando uma combustão completa de tal forma que esta elimine compostos tóxicos aos ecossistemas. A fluidodinâmica computacional é uma ferramenta cada vez mais usada na engenharia para o projeto, análise e aperfeiçoamento de equipamentos industriais, permitindo a previsão do comportamento do processo mesmo previamente à construção do equipamento. O objetivo deste trabalho foi analisar o desempenho de uma câmara de pós-combustão a ser utilizada no polimento da queima de um gás gerado a partir da incineração de resíduos de saúde, através de simulações empregando o software ANSYS CFX® 13.0. O gás, contendo componentes típicos de correntes provenientes de um incinerador é admitido na câmara sob uma temperatura de 950°C e o comburente, ar atmosférico, a 25°C. O desempenho da câmara foi avaliado pela distribuição espacial da temperatura e das concentrações de metano e monóxido de carbono; foram observadas taxas de conversão de 99,99% para estes componentes. Temperaturas ideais para a condução do processo foram observadas, e a simulação permitiu que alterações no projeto da câmara fossem propostas. Estes resultados demonstraram que a simulação do escoamento reativo na câmara de pós-combustão via fluidodinâmica computacional é uma ferramenta de grande utilidade na análise do desempenho deste tipo de equipamento.

Palavras-chave: Câmara de pós-combustão, fluidodinâmica computacional, incineração.

Lista de Figuras

Figura 1 - Fluxograma de um processo típico de incineração de resíduos sólidos	13
Figura 2 - Fluxograma de um processo típico de incineração de resíduos sólidos, com câmara gaseificadora	13
Figura 3 - Exemplo de uma malha computacional não estruturada para uma câmara de pós-combustão	19
Figura 4 - Malha estruturada (a) e não-estruturada (b).	19
Figura 5 - Estrutura de funcionamento do pacote ANSYS® CFX 13.0	20
Figura 6 - Câmara de pós-combustão avaliada (vista isométrica)	23
Figura 7 - Câmara de pós-combustão avaliada (vista frontal)	24
Figura 8 - Geometria da câmara de pós-combustão com o queimador	29
Figura 9 - Teste de convergência de malha através da queda de pressão total no equipamento	30
Figura 10 - Linhas de velocidade constante em um plano de corte central e perfil de velocidade na metade do comprimento do tubo de entrada, no mesmo plano de corte central, para malhas 1 e 2	31
Figura 11 - Linhas de velocidade constante em um plano de corte central e perfil de velocidade na metade do comprimento do tubo de entrada, no mesmo plano de corte central, para malhas 3 e 4	32
Figura 12 - Linhas de concentração constante de gás metano (CH_4) em um plano gerado na metade da largura da câmara (500mm), ilustrando o consumo do mesmo	34
Figura 13 - Linhas de concentração constante de gás metano (CH_4) em um plano gerado na à 1250 mm da base da câmara, ilustrando o consumo do mesmo	35
Figura 14 - Temperaturas no interior da câmara, tomadas em um plano gerado na metade da largura da câmara (500 mm)	36
Figura 15 - Superfícies de temperatura constante, no primeiro compartimento da câmara	36
Figura 16 - Linhas de corrente do escoamento, normalizadas de acordo com a velocidade local	37
Figura 17 - Linhas de corrente tomadas a partir da entrada, normalizadas conforme tempo de residência no interior do equipamento	38

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Classificação dos resíduos de serviço de saúde	6
Tabela 2 - Municípios com coleta do RSS, por existência e tipo de processamento	7
Tabela 3 - Municípios, total e com coleta e/ou recebimento de RSS, e existência no município de local (is) para disposição no solo dos RSS	8
Tabela 4 - Quadro comparativo das tecnologias de tratamento dos RSS	9
Tabela 5 - Composição do gás combustível.....	28
Tabela 6 - Parâmetros para cada malha testada.....	29
Tabela 7 - Número de elementos da malha utilizada nas simulações	33
Tabela 8 - Vazões das correntes de gases na entrada e na saída da câmara.	34
Tabela 9 - Conversão dos gases combustíveis	34
Tabela 10 - Temperaturas em diferentes pontos da câmara	35

Lista de Siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
ANVISA	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
BImSchV 17	Bundes-Immissionsschutzgesetzes
CEMPRE	Compromisso Empresarial para Reciclagem
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i>
EUA	Estados Unidos da América
IPT	Instituto de Pesquisas Tecnológicas
NBR	Norma Brasileira
PNRS	Política Nacional dos Resíduos Sólidos
RDC	Resolução da Diretoria Colegiada
RMS	<i>Root Mean Square</i>
RNG	<i>Renormalization Group Methods</i>
RSM	<i>Reynolds Stress Model</i>
RSS	Resíduos do Serviço de Saúde
SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SST	<i>Shear Stress Model</i>
SUASA	Sistema Único de Atenção à Sanidade Agropecuária
TECFLAM	Technical Flames

Lista de símbolos

C	concentração, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
C_p	calor específico, $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
$[CH_4]$	concentração molar de metano, $[\text{kmol}\cdot\text{kg}^{-1}]$
$[CO]$	concentração molar de monóxido de carbono, $[\text{kmol}\cdot\text{kg}^{-1}]$
D	difusividade, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-1}$
e	constante numérica igual a 2,718281
E	energia de ativação, $\text{kcal}\cdot\text{mol}^{-1}$
$[H_2O]$	concentração molar de água, $[\text{kmol}\cdot\text{kg}^{-1}]$
k_1	condutividade térmica, $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
k	energia cinética turbulenta, $\text{m}^2\cdot\text{s}^{-2}$
k_0	fator pré-exponencial, s^{-1} e $\text{mol}^{-0,75}\cdot\text{cm}^{2,25}\cdot\text{s}^{-1}$
$[O_2]$	concentração de oxigênio, $[\text{kmol}\cdot\text{kg}^{-1}]$
P	pressão, Pa
P_k	produção turbulenta, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{s}^{-3}$
R	constante universal dos gases, $\text{J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$
r_a	taxa volumétrica de conversão, $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{s}^{-1}$
t	tempo, s
Δt	escala de tempo, s
T	temperatura, K
u	componente de velocidade na direção longitudinal, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
U	módulo de velocidade, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
\bar{u}_i	componente médio de velocidade, $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
x	coordenada espacial longitudinal, m
y	coordenada espacial vertical, m
z	coordenada espacial transversal, m

Lista de símbolos Gregos

α	constante do modelo de turbulência $k-\omega$, adimensional (valor = 5/9)
β	constante do modelo de turbulência $k-\omega$, adimensional (valor = 0,075)
β'	constante do modelo de turbulência $k-\varepsilon$, adimensional (valor = 0,09)
μ	viscosidade dinâmica, Pa·s
ρ	massa específica, kg·m ⁻³
σ_k	constante do modelo de turbulência $k-\varepsilon$, adimensional (valor = 2)
σ_ω	constante do modelo de turbulência $k-\omega$, adimensional (valor = 2)

Sumário

1. Introdução	2
2. Objetivos	3
3. Revisão Bibliográfica	3
3.1 <i>Resíduos sólidos</i>	3
3.2 <i>Resíduos do serviço de saúde (RSS)</i>	5
3.2.1 Risco Ambiental	6
3.2.2 Responsabilidade sobre os RSS	7
3.2.3 Destinação dos resíduos de saúde no Brasil.....	7
3.2.4 Tecnologias de tratamento do RSS	8
3.3 <i>Incineração de resíduos</i>	9
3.3.1 Normas e Resoluções brasileiras sobre incineração dos RSS	10
3.3.2 Incineração <i>In Situ</i> e centralizada	11
3.3.3 Tipos de incineradores.....	11
3.3.4 Vantagens e desvantagens da incineração	14
3.3.5 Poluição gerada pelos incineradores	15
3.3.6 A influência da câmara de pós-combustão	16
3.4 <i>Fluidodinâmica computacional (CFD)</i>	17
3.5 <i>Análise de câmaras de combustão via CFD</i>	20
4. Metodologia.....	22
4.1 <i>Características da câmara de pós-combustão</i>	23
4.2 <i>Modelagem matemática</i>	24
4.2.1 Equação da continuidade	24
4.2.2 Conservação da quantidade de movimento.....	25
4.2.3 Conservação da energia.....	25
4.2.4 Conservação da massa por componente	25
4.2.5 Modelos de turbulência.....	26
4.3 <i>Condições de contorno e parâmetros de simulação</i>	28
5 Resultados	28
5.1 <i>Testes de malha</i>	28
5.2 <i>Análise da câmara de pós-combustão</i>	33
6 Conclusões.....	38
7 Sugestões para trabalhos futuros.....	39
Referências Bibliográficas	40

1. Introdução

A Agenda 21 constitui um marco mundial importante na busca do desenvolvimento sustentável a médio e longo prazo. É o principal documento da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento Humano, revelando as preocupações com o nosso futuro. Este documento foi assinado por 170 países, inclusive o Brasil (CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE O MEIO AMBIENTE E O DESENVOLVIMENTO, 1992).

O problema dos resíduos sólidos recebeu atenção especial. O tema foi discutido amplamente e, no capítulo 21, seção II – “Buscando soluções para o problema do lixo sólido” - são apontadas algumas propostas para o seu enfrentamento, entre as quais se destacam as seguintes recomendações:

- redução: redução do volume de resíduos na fonte, com ênfase no desenvolvimento de tecnologias limpas nas linhas de produção e análise do ciclo de vida de novos produtos a serem colocados no mercado;
- reutilização: reaproveitamento direto sob a forma de um produto, tal como as garrafas retornáveis e certas embalagens reaproveitáveis;
- recuperação: extração de algumas substâncias dos resíduos para uso específico como, por exemplo, os óxidos de metais;
- reciclagem: reaproveitamento cíclico de matérias-primas de fácil purificação como, por exemplo, papel, vidro, alumínio, entre outros;
- tratamento: transformação dos resíduos através de tratamentos físicos, químicos e biológicos;
- disposição final: promoção de práticas de disposição final ambientalmente seguras;
- recuperação de áreas degradadas: identificação e reabilitação de áreas contaminadas por resíduos;
- ampliação da cobertura dos serviços ligados aos resíduos: incluindo o planejamento, desde a coleta até a disposição final.

Seguindo a tendência mundial em preocupar-se com a correta destinação dos resíduos sólidos, em especial aqueles que apresentam grande risco à saúde humana, como é o caso do resíduo do serviço de saúde, o Brasil criou, recentemente, a Política Nacional dos Resíduos Sólidos. Esta lei ressalta a importância do tratamento de resíduos que apresentam risco à saúde pública, a fim de torná-los inertes, menos tóxicos e baixar a sua patogenicidade.

Uma das formas mais seguras de tratamento de resíduos de saúde é a incineração, que além de reduzir o volume, sanitiza e desintoxica os materiais, sendo também capaz de eliminar toda a fração orgânica dentro das câmaras de combustão do incinerador, onde ocorrem os processos de transformação dos resíduos em gases e sólidos. Por se tratarem de reações químicas exotérmicas, muitas vezes essa energia é recuperada e aplicada em algum processo industrial ou até geração de energia.

A avaliação de câmaras de combustão de incineradores pode ser feita de forma experimental ou por meio de simulações computacionais. A simulação computacional vem sendo cada vez mais aplicada no projeto, análise e otimização destes equipamentos, pois permite prever o comportamento do

processo antes mesmo da câmara ser construída, analisando a influência de diversas condições operacionais de forma relativamente simples e menos onerosa, quando comparada a estudos puramente experimentais.

2. Objetivos

Este trabalho tem como objetivo a avaliação via fluidodinâmica computacional do desempenho operacional de uma câmara de pós-combustão associada a um processo de incineração de resíduos sólidos. Esta câmara foi pré-dimensionada para a queima de uma determinada vazão de gases provenientes de uma câmara de incineração primária, sendo que a partir dos resultados deste estudo, a mesma será construída e operada por uma empresa de projetos e construção de incineradores.

De forma mais específica, busca-se:

a) Verificar se a configuração e as dimensões da câmara propostas permitem oxidar satisfatoriamente o gás não queimado na primeira câmara de combustão de um incinerador;

b) Verificar se é possível a utilização de ar na temperatura ambiente como comburente da queima, ou se é preciso pré-aquecê-lo antes de alimentá-lo a câmara;

c) Avaliar a influência de parâmetros operacionais relevantes na eficiência do processo.

3. Revisão Bibliográfica

3.1 Resíduos sólidos

Resíduo sólido é o material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semi-sólido, 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 técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (Lei 12.305/2010).

De acordo com IPT/CEMPRE (2000), os resíduos sólidos podem ser classificados de várias formas: 1) por sua natureza física (seco ou molhado); 2) por sua composição química (matéria orgânica e inorgânica); 3) pelos riscos potenciais ao meio ambiente; e 4) quanto à origem.

No entanto, as normas e resoluções existentes classificam os resíduos sólidos em função dos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde, como também, em função da natureza e origem. Com relação aos riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, a NBR 10.004/2004 classifica os resíduos sólidos em duas classes: classe I e classe II.

Os resíduos classe I, denominados como perigosos, são aqueles que, em função de suas propriedades físicas, químicas ou biológicas, podem apresentar riscos à saúde e ao meio ambiente. São caracterizados por possuírem uma ou mais das seguintes propriedades: inflamabilidade, corrosividade, reatividade, toxicidade e patogenicidade.

Os resíduos classe II denominados não perigosos são subdivididos em duas classes: classe II-A e classe II-B.

- Os resíduos classe II-A - não inertes, podem ter as seguintes propriedades: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água.
- Os resíduos classe II-B – inertes, não apresentam nenhum de seus constituintes solubilizados a concentrações superiores aos padrões de potabilidade de água, com exceção dos aspectos cor, turbidez, dureza e sabor.

Com relação à origem e natureza, os resíduos sólidos são classificados em: domiciliar, comercial, varrição e feiras livres, serviços de saúde, portos, aeroportos e terminais rodoviários e ferroviários, industriais, agrícolas e resíduos de construção civil.

Com relação à responsabilidade pelo gerenciamento dos resíduos sólidos pode-se agrupá-los em dois grandes grupos.

O primeiro grupo refere-se aos resíduos sólidos urbanos, compreendido pelos:

- resíduos domésticos ou residenciais;
- resíduos comerciais;
- resíduos públicos.

O segundo grupo, dos resíduos de fontes especiais, abrange:

- resíduos industriais;
- resíduos da construção civil;
- resíduos radioativos;
- resíduos de portos, aeroportos e terminais rodoferroviários;
- resíduos agrícolas;
- resíduos de serviços de saúde.

A Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS), regida pela Lei nº12.305 de 02/08/2010, reúne princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações a serem adotadas pela união, isoladamente ou em parceria com estados, Distrito Federal, municípios e particulares visando a gestão integrada e o gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos.

A partir de alguns trechos descritos a seguir, a PNRS ressalta a importância de um apropriado tratamento que o resíduo deve receber, antes da sua disposição final, quando se julgar ambientalmente necessário:

Art. 3º, inciso VII - destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do SISNAMA, do SNVS e do SUASA, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

Art. 7º - São objetivos da Política Nacional de Resíduos Sólidos:

IV - adoção, desenvolvimento e aprimoramento de tecnologias limpas como forma de minimizar impactos ambientais;

V - redução do volume e da periculosidade dos resíduos perigosos;

Art. 9º - Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.

§ 1º Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.

3.2 Resíduos do serviço de saúde (RSS)

De acordo com a RDC ANVISA 306/04 e a Resolução CONAMA 358/2005, são definidos como geradores de RSS todos os serviços relacionados com o atendimento à saúde humana ou animal, inclusive os serviços de assistência domiciliar e de trabalhos de campo; laboratórios analíticos de produtos para a saúde; necrotérios, funerárias e serviços onde se realizem atividades de embalsamento, serviços de medicina legal, drogarias e farmácias, inclusive as de manipulação; estabelecimentos de ensino e pesquisa na área da saúde, centro de controle de zoonoses; distribuidores de produtos farmacêuticos, importadores, distribuidores, produtores de materiais e controles para diagnóstico *in vitro*, unidades móveis de atendimento à saúde; serviços de acupuntura, serviços de tatuagem, dentre outros similares.

Os resíduos de serviços de saúde são parte importante do total de resíduos sólidos urbanos, não necessariamente pela quantidade gerada (cerca de 1% a 3% do total), mas pelo potencial de risco que representam à saúde e ao meio ambiente (ANVISA, 2006).

Os RSS são classificados em função de suas características e consequentes riscos que podem acarretar ao meio ambiente e à saúde. De acordo com a RDC ANVISA nº 306/04 e Resolução CONAMA no 358/05, os RSS são classificados em cinco grupos: A, B, C, D e E, de acordo com a Tabela 1:

Tabela 1 - Classificação dos resíduos de serviço de saúde

Resíduo de saúde	
Grupo	Resíduo
A	Resíduos Potencialmente Infectantes
A1	Culturas e estoques de microorganismos
A2	Carcaças, peças anatômicas, vísceras de animais possivelmente contaminados
A3	Peças anatômicas (membros) de seres humanos
A4	Kits de linhas arteriais, endovenosas e dialisadores, quando descartados
A5	Órgãos, tecidos, fluidos orgânicos e materiais perfurocortantes contaminados com príons
B	Resíduos Químicos
C	Rejeitos Radioativos
D	Resíduos equiparados aos resíduos domiciliares (resíduos comuns), não contaminados
E	Resíduos Perfurocortantes

3.2.1 Risco Ambiental

O desenvolvimento científico e a evolução econômica do Brasil permitiram uma expansão do número de hospitais e centros de tratamentos clínicos. Porém estes locais que curam, tratam e/ou atendem as necessidades de intervenções médicas geram um tipo especial de resíduo: o resíduo hospitalar. Este subproduto pode estar infectado por patógenos e ainda conter produtos químicos tóxicos que podem colocar em risco a saúde humana.

Dentre os componentes biológicos destacam-se os que contêm agentes patogênicos que possam causar doença e dentre os componentes radioativos utilizados em procedimentos de diagnóstico e terapia, os que contêm materiais emissores de radiação ionizante (ANVISA, 2006).

Para a comunidade científica e entre os órgãos federais responsáveis pela definição das políticas públicas pelos resíduos de serviços saúde (ANVISA e CONAMA) esses resíduos representam um potencial de risco em duas situações:

- a) para a saúde ocupacional de quem manipula esse tipo de resíduo, seja o pessoal ligado à assistência médica ou médico-veterinária, seja o pessoal ligado ao setor de limpeza e manutenção;
- b) para o meio ambiente, como decorrência da destinação inadequada de qualquer tipo de resíduo, alterando as características do meio.

Quanto ao meio ambiente, destaca-se o potencial de contaminação do solo, das águas superficiais e subterrâneas pelo lançamento de RSS em lixões ou aterros controlados que também proporcionam riscos aos catadores, principalmente por meio de lesões provocadas por materiais cortantes e/ou perfurantes, e por ingestão de alimentos contaminados, ou aspiração de material particulado contaminado em suspensão (ANVISA, 2006).

3.2.2 Responsabilidade sobre os RSS

Os estabelecimentos de serviços de saúde são os responsáveis pelo correto gerenciamento de todos os RSS por eles gerados, cabendo aos órgãos públicos, dentro de suas competências, a gestão, regulamentação e fiscalização.

Embora a responsabilidade direta pelos RSS seja dos estabelecimentos de serviços de saúde, por serem os geradores, pelo princípio da responsabilidade compartilhada, esta responsabilidade se estende também a outros: ao poder público e às empresas de coleta, tratamento e disposição final. A Constituição Federal, em seu artigo 30, estabelece como competência dos municípios "organizar e prestar, diretamente ou sob o regime e concessão ou permissão, os serviços públicos de interesse local, incluído o de transporte coletivo que tem caráter essencial" (ANVISA, 2006).

3.2.3 Destinação dos resíduos de saúde no Brasil

Conforme a Pesquisa Nacional de Saneamento Básico (PNSB, 2010), do IBGE, 80% dos municípios brasileiros recolhem os RSS, sendo que destes, apenas 58% apresentam algum tipo de tratamento para o resíduo, no município, como pode ser visualizado na Tabela 2. A incineração é a forma de processamento predominante nas regiões Sul, Sudeste e Centro-Oeste, sendo ultrapassada pela queima a céu aberto nas regiões Norte e Nordeste.

Tabela 2 - Municípios com coleta do RSS, por existência e tipo de processamento (adaptado da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008-IBGE)

Grandes Regiões	Municípios com coleta e/ou recebimento de resíduos sólidos de serviços de saúde sépticos								Não existe processamento dos resíduos de serviço de saúde sépticos
	Total	Existência no município de processamento dos resíduos sólidos dos serviços de saúde sépticos							
		Total	Tipo de processamento						
			Incineração	Queima em fornos simples	Queima a céu aberto	Tratamento em autoclave	Tratamento por microondas	Outro	
Brasil	4469	2613	1379	131	616	763	76	291	1856
Norte	304	140	48	10	69	1	-	23	164
Nordeste	1309	790	276	48	439	6	-	75	519
Sudeste	1492	806	488	38	68	285	57	99	686
Sul	997	705	487	5	1	461	19	67	292
Centro-Oeste	367	172	80	30	39	10	-	27	195

Nota: O município pode apresentar mais de um tipo de processamento dos RSS.

Com relação à destinação final, como pode ser verificado na Tabela 3, cerca de 45% dos municípios dispõem seus RSS diretamente no solo, sem nenhum tipo de proteção (lixões), 17,5% depositam em aterros convencionais, em conjunto com os demais resíduos urbanos e somente 25% dispõem em aterros específicos para resíduos especiais. Deve-se ater ao fato de que um mesmo município pode apresentar mais de uma forma de disposição final do resíduo.

Tabela 3 - Municípios, total e com coleta e/ou recebimento de RSS, e existência no município de local (is) para disposição no solo dos RSS (adaptado da Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2008-IBGE)

Grandes Regiões	Municípios							
	Total	Com coleta e/ou recebimento de resíduos sólidos de serviços de saúde sépticos						
		Total	Que têm locais no município para disposição no solo desses resíduos					
			Total	Forma de disposição dos resíduos no solo do município				
	Em vazadouro, junto com os demais resíduos	Sob controle, em aterro convencional, em conjunto com os demais resíduos	Sob controle, em aterro da prefeitura específico para resíduos especiais	Sob controle, em aterro de terceiros específico para resíduos especiais				
Brasil	5564	4469	2358	1060	412	522	58	359
Norte	449	304	275	149	35	51	6	39
Nordeste	1793	1309	1080	698	101	146	11	145
Sudeste	1668	1492	679	120	204	243	23	109
Sul	1188	997	54	3	19	5	12	17
Centro-Oeste	466	367	270	90	53	77	6	49

Nota: O município pode apresentar mais de uma forma de disposição no solo dos RSS.

3.2.4 Tecnologias de tratamento do RSS

Entende-se por tratamento dos resíduos sólidos, de forma genérica, quaisquer processos manuais, mecânicos, físicos, químicos ou biológicos que alterem as características dos resíduos, visando a minimização do risco à saúde, a preservação da qualidade do meio ambiente, a segurança e a saúde do trabalhador.

O tratamento pode ser feito no estabelecimento gerador ou em outro local, observadas, nestes casos, as condições de segurança para o transporte entre o estabelecimento gerador e o local do tratamento. Os sistemas para tratamento de RSS devem ser objeto de licenciamento ambiental, de acordo com a Resolução CONAMA no 237/97 e são passíveis de fiscalização e de controle pelos órgãos de vigilância sanitária e de meio ambiente (ANVISA, 2006).

De acordo com GANDOLLA, 1997, os processos de tratamento de RSS se subdividem substancialmente em dois tipos:

- tratamento “parcial” ou esterilizante é aquele realizado antes do encaminhamento dos RSS para outra instalação de tratamento. A massa e as propriedades físico-químicas não são fundamentalmente modificadas. Os tratamentos “parciais” atualmente existentes no mercado são geralmente autoclavagem, tratamentos químicos, irradiação e microondas.
- tratamento “completo” (inertização físico-química) é aquele realizado com o objetivo de permitir a disposição final no meio ambiente de maneira segura. Os tratamentos “completos” existentes atualmente no mercado são geralmente do tipo térmico e alcançam temperaturas entre 800°C e 1200°C. Nessa categoria estão o incinerador, o queimador elétrico e a tocha de plasma.

Normalmente, apenas os tratamentos “completos” garantem a realização dos seguintes objetivos:

- esterilização do fluxo de saída (como por exemplo, sangue, restos da sala de cirurgia, etc).
- destruição de moléculas altamente tóxicas e estabilização de elementos críticos (metais pesados presentes no fluxo de saída, como por exemplo, medicamentos vencidos ou parcialmente utilizados, materiais contaminados com tais medicamentos, etc.).
- destruição das moléculas responsáveis pelo efeito curativo dos medicamentos geralmente presentes nos fluxos de saída (como medicamentos vencidos ou parcialmente utilizados) (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2001).

O quadro comparativo, apresentado na Tabela 4, ressalta qualitativamente os pontos positivos e negativos das diferentes tecnologias de tratamento dos resíduos de saúde:

Tabela 4 - Quadro comparativo das tecnologias de tratamento dos RSS. Fonte: Manual para técnicos e inspectores de saneamento - Programa Regional de Desechos Sólidos Hospitalarios. Convenio ALA 91/33, 1998

PROCESSO	REDUÇÃO DE VOLUME	EFICIÊNCIA DE DESEINFECÇÃO	IMPACTO AMBIENTAL	CAPACITAÇÃO PESSOAL	CAPACIDADE DE TRATAMENTO	CUSTO DE IMPLANTAÇÃO	CUSTO DE OPERAÇÃO
Tratamento Químico	baixa	incompleta	média	média	média-alta	média	média
Autoclave	baixa	alta	baixa	média ^(*)	média-baixa	média	média
Irradiação	baixa	baixa	média	alta	pequena unidade	alta	alta
Microondas	baixa	alta	baixa	alta	pequena unidade	alta	alta
Incineração	alta	alta ^(**)	baixa	alta	sem limites	alta	alta

(*) Não sendo considerada a capacitação necessária para se manejar equipamentos de produção de vapor;

(**) Considerando-se incineradores de tecnologia avançada.

3.3 Incineração de resíduos

Incineração é um processo de redução da massa, volume e das características de periculosidade dos resíduos, com a conseqüente eliminação da matéria orgânica e características de patogenicidade, através da combustão controlada (LIMA, 1991). A incineração permite a utilização da energia liberada na queima dos materiais, visando à produção de energia elétrica e/ou de vapor (CALDERONI, 1999).

A incineração converte os resíduos em cinza, gases de combustão e calor. A maior parte da cinza é constituída pelos componentes inorgânicos dos resíduos, e pode assumir a forma de pedaços sólidos ou partículas transportadas pelo gás de combustão. Os gases de combustão devem ser limpos de poluentes gasosos e de material particulado, antes de serem dispersos no ar. Em alguns casos, o calor gerado por incineração pode ser utilizado para gerar energia elétrica. Incineração com recuperação de energia é um exemplo de tecnologia “*Waste to Energy*” aplicada mundialmente, assim como gaseificação, digestão anaeróbica e pirólise.

Incineradores reduzem a massa sólida do resíduo original de 80-85% e o volume em 95-96%, dependendo da composição e do grau de recuperação de materiais (RENOSAM e RAMBOLL, 2006). Isto significa que, embora a incineração não substitua completamente a disposição em aterro, reduz substancialmente o volume necessário para a eliminação.

Independentemente de os resíduos serem destruídos, todos os incineradores apresentam uma zona onde o resíduo é inflamado e misturado com o ar para promover a combustão. A maioria dos incineradores fornece ar adicional para completar o processo de combustão. Após o resíduo ter sido oxidado no forno, partículas, geralmente referidas como cinzas de fundo, devem ser removidas da câmara (CHANDLER, A. J. *et al*, 2006).

Os incineradores modernos são equipados com duas câmaras de combustão (primária e secundária) providas de queimadores capazes de alcançar a combustão completa dos resíduos e uma ampla destruição das substâncias químicas nocivas e tóxicas (dioxinas, furanos, etc.). Na câmara de combustão secundária se alcançam temperaturas em torno de 1100°C e se opera com um tempo de residência de no mínimo dois segundos. Para o tratamento das correntes efluentes de gases contendo poluentes e material particulado, antes de serem liberadas na atmosfera, são agregados processos de separação, como torres de lavagem química, ciclones, filtros, entre outros (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2001).

Os incineradores operam com máxima eficiência quando os resíduos que queimam têm poder calorífico suficientemente alto, ou seja, quando a combustão produz uma quantidade de calor suficiente para evaporar a umidade dos resíduos e manter a temperatura sem a necessidade de adicionar mais combustível.

Para muitos tipos de resíduos, a incineração tem-se tornado atrativa e por vezes elemento necessário na gestão de resíduos. Para resíduos, sejam líquidos, sólidos ou gasosos, que quando incinerados não geram cinzas, o processo de combustão pode vir a ser encarado como disposição final, apesar de que, para a maioria dos líquidos e sólidos, a incineração é apenas uma etapa de processamento do resíduo (NIESSEN, 2010).

3.3.1 Normas e Resoluções brasileiras sobre incineração dos RSS

O Brasil, a exemplo de outros países, passou a regulamentar os processos térmicos de tratamento de resíduos, e de maneira constante vem atualizando a sua legislação, através de leis e normativas que são sancionadas de acordo com a necessidade e a evolução das tecnologias de processamentos. A seguir estão as principais diretrizes legais da incineração de resíduos de saúde no Brasil:

- Resolução nº 316/2002 do CONAMA: regulamenta o processo da incineração e seus limites de emissão. Permite incinerar resíduos urbanos, hospitalares, industriais e cadáveres.
- Norma da ABNT NBR 11175: Incineração de resíduos sólidos perigosos – padrões de desempenho.

- Resolução nº 05/1993 do CONAMA: dispõe sobre o gerenciamento de resíduos sólidos gerados nos portos, aeroportos, terminais ferroviários e rodoviários. Nota: Revogadas as disposições que tratam de resíduos sólidos oriundos de serviços de saúde pela Resolução CONAMA nº 358/05.
- Resolução nº 283/2001 do CONAMA: exige a apresentação de um *Plano de Gerenciamento de Resíduos de Serviços da Saúde* dos geradores destes, onde se recomenda a incineração para lixo patogênico. Nota: Revogada pela Resolução CONAMA nº 358/2005.
- Resolução nº 358/2005 do CONAMA: dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos dos serviços de saúde.
- Resolução RDC nº 306/2004 da ANVISA: dispõe sobre o Regulamento Técnico para o gerenciamento de resíduos de serviços da saúde. Recomenda a incineração para os resíduos do grupo A2, quando estes atingem certos níveis de contaminação e para o grupo A3.

3.3.2 Incineração *In Situ* e centralizada

A incineração *In Situ* é conduzida em unidades de baixa capacidade, implantada junto à fonte geradora do resíduo. Os antigos fornos hospitalares têm geralmente capacidade inferior a uma tonelada por hora e funcionam de maneira descontínua, causando poluição a cada fase de partida. Frequentemente, não possuem tratamento apropriado dos gases gerados. Os resíduos são incinerados a temperaturas de 300°C a 400°C, porém, é necessário no mínimo uma temperatura de 800°C para assegurar uma combustão completa (MINISTÉRIO DA SAÚDE, 2001).

Já na incineração centralizada, os resíduos de serviços de saúde são agrupados tendo em vista o seu tratamento em instalações de maior capacidade que são geralmente mais rentáveis e mais satisfatórias sob o ponto de vista da proteção do meio ambiente (SUIÇA, 1994).

Pode-se recorrer a três tipos de soluções:

- tratamento em incineradores para RSS que tratam vários estabelecimentos de saúde;
- tratamento em incineradores para resíduos perigosos, geralmente em fornos rotativos destinados à incineração de resíduos perigosos industriais, sólidos ou pastosos;
- tratamento em usinas de incineração de resíduos domésticos aptas a incinerar RSS, podendo ser instalações autônomas ou de linhas de fornos específicos localizados ao lado de usinas de incineração de lixo doméstico com tratamento conjunto dos gases.

3.3.3 Tipos de incineradores

A seguir, são citados alguns dos incineradores mais encontrados no mercado:

- Incineradores de forno rotativo: O forno é um cilindro montado com leve ângulo em relação a horizontal. À medida que o forno roda e os resíduos se movem pela sua inclinação, as substâncias químicas orgânicas nos resíduos são

convertidas em gases, sendo parcialmente oxidados. Os gases passam então pelo pós-queimador (ou câmara de combustão secundária), onde uma combustão mais completa é alcançada. As cinzas são, então, removidas do forno. São fornos de grande porte, comuns nos EUA. São versáteis, e aceitam gases, líquidos, sólidos.

- Incineradores de leito fluidizado: O leito consiste em um material inerte e granular, normalmente areia, que é suspenso por ar pressurizado em um estado altamente turbulento ou fluidizado acima da câmara de combustão. Os resíduos são transportados para o leito fluidizado onde o contato direto com o material do leito torna mais eficiente a transferência de calor.
- Incineradores de injeção líquida: Combustores de injeção líquida podem ser utilizados para a disposição de qualquer resíduo líquido, combustível ou não (lodos, suspensões, líquidos). O coração do sistema de injeção líquida é o dispositivo de atomização do resíduo que o mistura com o ar formando uma suspensão, que é imediatamente enviada para a câmara de combustão.
- Incineradores de leito móvel: o resíduo é adicionado na parte superior da grelha e conforme vai sendo transportado por cima da grelha ele seca, pirolisa e queima. A cinza é retirada pela parte de baixo. O ar primário é adicionado a partir da grelha e secundariamente por cima do resíduo, para uma melhor turbulência e contato entre o gás de combustão e o oxigênio (SMEDBERG, 2009).
- Incineradores de leito fixo: Os resíduos são depositados em cima da grelha, onde passam pelos processos de secagem, volatilização (voláteis leves e densos), gaseificação e oxidação completa. Tipicamente, este processo é dividido em duas câmaras, denominadas combustão e pós-combustão. É de construção mais simples que os incineradores anteriormente citados. Dependendo do resíduo (poder calorífico e umidade) necessita a utilização dos queimadores também na operação, além de sua função primordial no aquecimento das câmaras que antecede o início da operação.
- Gaseificação: A gaseificação é um processo que altera química e fisicamente a biomassa por meio da adição de calor, num ambiente pobre em oxigênio. Os produtos finais da gaseificação incluem sólidos, cinzas, líquidos e gases. Tipicamente, incineradores que incluem a gaseificação como etapa inicial são constituídos por duas câmaras: a primária que opera com oxigênio abaixo do estequiométrico e a segunda operando em condições de excesso de ar. O resíduo é alimentado para dentro da câmara primária, libertando os componentes voláteis. O calor é fornecido pela combustão controlada da segunda câmara. O gás gerado contém um elevado poder calorífico e atua como matéria-prima para a câmara secundária. É importante notar que o ar de combustão é então adicionado ao gás, tornando altamente combustível e propenso à autoignição. A câmara secundária está equipada com um queimador convencional para manter a temperatura de operação estável em todos os momentos. Cabe aqui diferenciar que na pirólise o material é aquecido na ausência de oxigênio (THE BLUE RIDGE ENVIRONMENTAL DEFENSE LEGUE, 2009).

Incineradores de leito fixo são empregados no tratamento de resíduos do serviço de saúde, certos tipos de resíduos perigosos e pequenas quantidades de resíduos sólidos urbanos (CHANDLER, A. J. *et al*, 2006). Fornos de leito fluidizado podem ser aplicados na eliminação de lodo de esgoto, eliminação de

resíduos perigosos e disposição de resíduos sólidos urbanos. Fornos rotativos são frequentemente utilizados na destruição de resíduos perigosos.

Incineradores especiais, com combinação de tecnologias, são projetados de acordo com a necessidade, levando-se em conta a quantidade de resíduo a ser tratado, o tipo de resíduo, o nível de tratamento requerido e as legislações ambientais vigentes.

A Figura 1 ilustra, resumidamente, um sistema clássico de incineração, mostrando as diversas correntes de processo, desde a alimentação do resíduo até a sua transformação em gases e cinzas.

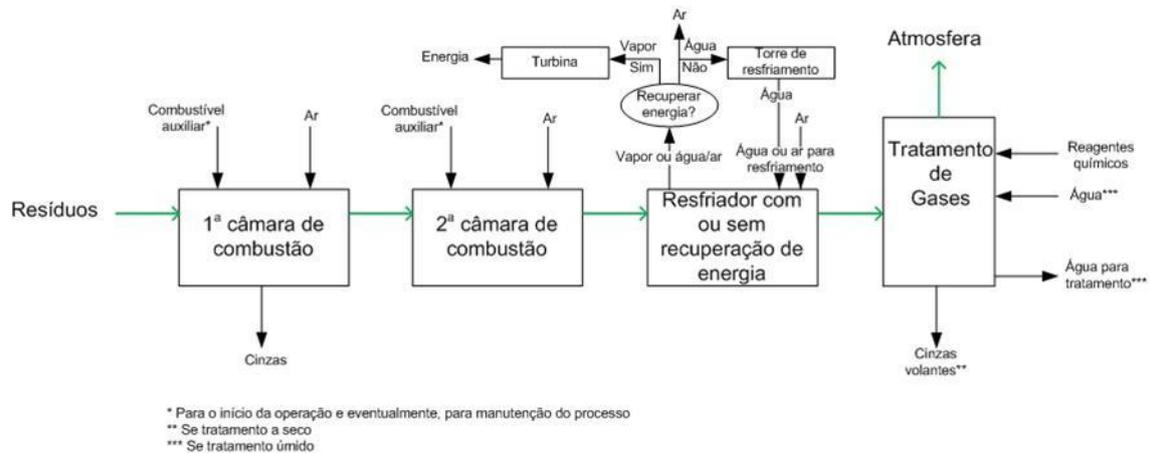


Figura 1 - Fluxograma de um processo típico de incineração de resíduos sólidos

A Figura 2, a exemplo da Figura 1, exemplifica um sistema de incineração, porém com uma câmara extra, onde as reações de degradação da parcela volátil ocorrem separadamente das reações de combustão, que vão acontecer na primeira e segunda câmara de combustão.

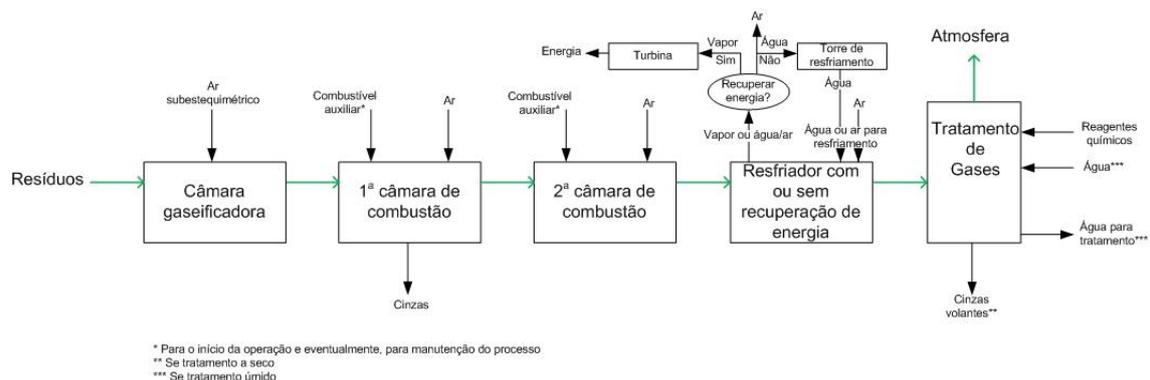


Figura 2 - Fluxograma de um processo típico de incineração de resíduos sólidos, com câmara gaseificadora

Observa-se um grande esforço de pesquisas que focam no desenvolvimento de sistemas que substituem à limpeza dos gases via processos úmidos por sistemas de filtração a seco, porém estas soluções

tecnológicas ainda não são largamente empregadas no Brasil, especialmente quanto ao abatimento de gases ácidos.

3.3.4 Vantagens e desvantagens da incineração

NIESSEN (2010) ressalta as seguintes vantagens do tratamento por incineração:

- Redução de volume: Eficiente para sólidos volumosos, resíduos de alto poder calorífico e até mesmo para aqueles que contêm umidade.
- Desintoxicação: Especialmente para combustíveis cancerígenos, materiais patologicamente contaminados, componentes orgânicos tóxicos ou materiais ativos biologicamente que afetam plantas de tratamento de esgoto.
- Mitigação de impacto ambiental: Especialmente para materiais orgânicos que percolam de aterros e/ou que causam odores desagradáveis. Adicionalmente, o impacto do gás de efeito estufa CO_2 gerado na incineração de resíduos sólidos é substancialmente menor que o impacto causado pelo metano (CH_4).
- Recuperação de energia: Importante quando se tem grandes quantidades de resíduos orgânicos termicamente degradáveis disponíveis e proximidade de indústrias que tenham demanda por vapor e/ou eletricidade.
- Estabilização de aterros: A biodegradação da matéria orgânica promove a movimentação dos resíduos e a formação de gases que rompem as estruturas das células de nivelamento. A destruição da matéria orgânica, antes da disposição no aterro, elimina este problema.
- Diluição: Particularmente importante para resíduos de baixa radioatividade onde a combustão com excesso de ar e combustível dilui a concentração dos isótopos radioativos residuais (e indestrutíveis) para concentrações que não apresentam riscos à saúde.
- Sanitização: destruição de organismos patogênicos que representam um perigo para a saúde pública.

Estas vantagens têm justificado o desenvolvimento de uma variedade de sistemas de incineração, com complexidades e funções bastante distintas, de acordo com o resíduo que se vai processar, a fim de atender às normas vigentes e à necessidade dos municípios e das indústrias. Contudo, o autor também apresenta as desvantagens que a tecnologia oferece:

- Custo: Tipicamente, a incineração é uma etapa cara do processamento do resíduo, tanto no investimento inicial quanto na operação.
- Problemas operacionais: Variabilidade na composição do resíduo e do desempenho do incinerador, elevados custos de manutenção e falta de confiabilidade de alguns equipamentos.
- Reação do setor público: Alguns incineradores são instalados sem uma análise minuciosa do consenso local, e as vezes enfrentam hostilidades ou profundos conflitos políticos e com órgãos ambientais.
- Risco técnico: O processo de combustão é extremamente complexo. Alterações nas características dos resíduos são comuns, e isto altera o processo da queima. Este e outros fatores contribuem para o risco de que o novo incinerador não venha a funcionar como o desejado. Na maior parte dos casos, o déficit de rendimento é corrigido por onerosas manutenções.

- Poluição: Caso algum dispositivo de segurança venha a falhar, ou até mesmo o monitoramento dos gases não for eficiente, componentes tóxicos podem ser emitidos para a atmosfera, e ainda corre-se o risco de não descontaminar os resíduos, caso a combustão não seja completa.

Apesar das limitações, a incineração persistiu como uma importante forma de tratamento de resíduos. Aproximadamente 12,5% de todos os resíduos sólidos urbanos dos Estados Unidos foram incinerados em 2006 (NIESSEN, 2010). Uma fração considerada (e crescente) dos resíduos tem sido incinerada na Europa e no Japão.

3.3.5 Poluição gerada pelos incineradores

Como subproduto do tratamento dos resíduos, os incineradores geram cinzas e emissões atmosféricas. Desta maneira, antes do gás passar pelo sistema de tratamento, ele pode conter quantidades significativas de material particulado, metais pesados, dioxinas, furanos, óxidos de enxofre (SO_x), óxidos de nitrogênio (NO_x), ácido clorídrico, ácido fosfórico, entre outros.

Em um estudo realizado desde 1994, a Delaware Solid Waste Authority registrou que, para uma mesma quantidade de energia produzida, plantas de incineração de resíduos sólidos emitiram menos particulados, hidrocarbonetos e menos SO₂, HCl, CO e NO_x do que usinas elétricas à carvão, porém mais do que usinas de gás natural (DELAWARE SOLID WASTE AUTHORITY, 2008). De acordo com o Ministério Alemão do Meio Ambiente, incineradores de resíduos sólidos reduzem as emissões de poluentes atmosféricos quando são usados para substituir usinas a carvão na produção de energia (FEDERAL MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT, NATURE CONSERVATION AND NUCLEAR SAFETY OF GERMANY, 2005).

Em 2005, o Ministério Alemão do Meio Ambiente, que na época contabilizou 66 incineradores, estimou que no ano de 1990 um terço das emissões de dioxinas e furanos na Alemanha vinham de plantas de incineração, ao passo que em 2000 o quadro mudou para menos de 1%. Os fogões a lenha e lareiras em casas privadas descarregaram aproximadamente 20 vezes mais dioxinas para o meio ambiente do que as plantas de incineração (FEDERAL MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT, NATURE CONSERVATION AND NUCLEAR SAFETY OF GERMANY, 2005).

Quase todo resíduo biodegradável tem origem biológica. Este material é formado por plantas que utilizam o CO₂ atmosférico, tipicamente na última estação de crescimento. Se estas plantas crescerem novamente com o CO₂ emitido pelos incineradores, elas vão sequestrar novamente o CO₂ atmosférico.

Estas considerações são algumas razões para as quais muitos países administram a incineração das partes biodegradáveis do resíduo como energia renovável (RENEWABLE ENERGY ASSOCIATION, 2012). Já para as partes restantes – plásticos, óleos, e produtos derivados de gases – a incineração é tratada como não renovável.

A quantidade de poluentes no gás de combustão de instalações de incineração pode ser reduzida por vários processos. Material particulado pode ser coletado por filtração, precipitadores eletrostáticos ou filtros de mangas. Lavadores de gases ácidos podem ser utilizados para remover o ácido clorídrico, ácido nítrico, ácido fluorídrico, entre outros. Águas residuais de lavadores devem posteriormente passar por uma estação de tratamento de águas residuais (GODINHO, 2006).

Entre as principais preocupações com o uso dos incineradores, está a emissão de dioxinas. Conforme (UNILABS ENVIRONMENTAL, 1999), o controle da emissão das dioxinas pode ser feito de quatro maneiras:

1. Não queimando materiais clorados;
2. Controlando a combustão;
3. Restringindo a sua formação;
4. Realizando-se a limpeza dos gases de combustão depois da sua formação.

3.3.6 A influência da câmara de pós-combustão

A câmara de pós-combustão, para a maioria dos incineradores, é o último recurso para que se garanta uma combustão completa, uma vez que ela fica entre o incinerador e o tratamento de gases, conforme ilustrado nas Figuras 1 e 2. Desta maneira, além ser responsável por terminar a queima dos gases, ela tem função de proteger o sistema de limpeza dos gases, pois quanto mais completa é a queima, menor é o teor de particulados e de outros gases que sobrecarregam o sistema de limpeza.

As dioxinas são formadas por anéis benzênicos clorados. Em geral, a desagregação das dioxinas requer exposição do anel benzênico molecular a uma temperatura suficientemente elevada de modo a provocar decomposição térmica das fortes ligações moleculares que prendem o conjunto. Daí a importância do correto dimensionamento, em especial para câmaras de grandes volumes, a fim de se evitar zonas frias.

Na segunda câmara é introduzido oxigênio em excesso de modo a conseguir uma destruição dos compostos orgânicos voláteis formados em consequência da combustão incompleta do resíduo, onde a temperatura deve ser maior que 900°C e o tempo de residência superior a 2 segundos (REMÉDIOS DOS REIS, 2009).

O ponto de equilíbrio entre temperatura alta e tempo de residência é um critério de extrema importância no dimensionamento das câmaras de incineração. De uma maneira geral, quanto maior a temperatura da câmara, menor o tempo de exposição para que as reações ocorram; entretanto, operação prolongada sob temperaturas excessivamente elevadas pode também desgastar e danificar o incinerador. Por outro lado, se as temperaturas de operação são demasiadamente baixas, os gases deverão ser expostos a um período mais prolongado, já que as reações ocorrem numa velocidade

menor. Isto implicaria em câmaras maiores, que oneram a sua produção e exigem um maior espaço físico que as abrigue.

O “BImSchV 17” (Lei Federal 17, de Controle da Poluição) é um exigente decreto alemão para a combustão de resíduos, que estabelece limites de emissão, bem como as condições de funcionamento. Algumas das condições mais importantes citadas são que o teor de oxigênio mínimo deve ser de 6% no gás de combustão seco e que o tempo mínimo de residência na câmara de pós-combustão deve ser também igual a 2 segundos, numa temperatura superior a 850°C (BUNDESGESETZBLATT I, 2003).

A diretiva relativa à incineração de resíduos do Guia de Licenciamento Ambiental da Inglaterra e País de Gales (DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD AND RURAL AFFAIRS, 2009) declara: “Todos os incineradores e co-incineradores de queima de resíduos devem ser concebidos, equipados, construídos e operados de modo tal que os gases resultantes do processo são elevados a uma temperatura de 850°C durante 2 segundos”.

A Resolução CONAMA n° 316, de 29 de outubro de 2002, que dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos, declara, no Art. 13, parágrafo único: “As câmaras deverão operar à temperatura mínima de 800°C, e o tempo de residência dos gases em seu interior não poderá ser inferior a um segundo”.

3.4 Fluidodinâmica computacional (CFD)

Fluidodinâmica computacional ou dinâmica de fluidos computacional (*Computational Fluid Dynamics* – CFD) pode ser descrita de forma simplificada como a simulação numérica de processos que envolvam o escoamento de fluidos em um sistema de interesse, podendo estar presentes processos de transferência de calor e massa, reações químicas, entre outros fenômenos. O procedimento essencialmente consiste em resolver numericamente as equações de conservação (quantidade de movimento, calor, massa) de forma acoplada e sujeitas a condições de contorno especificadas, obtendo-se assim os valores das variáveis de interesse (p.ex., velocidade, temperatura, concentração) em pontos discretos do sistema. A partir desta distribuição espacial e temporal das variáveis, uma análise detalhada dos resultados pode ser conduzida usando ferramentas de pós-processamento, permitindo por exemplo, a direta visualização dos padrões de escoamento, e a identificação de regiões de alta e baixa temperatura em processos não-isotérmicos, entre muitas outras possibilidades.

Devido a seu grande potencial de aplicação, precisão, versatilidade e relativo baixo custo comparado à realização de experimentos ou testes em escala piloto, a fluidodinâmica computacional é aplicada em diversas áreas da ciência e engenharia, como por exemplo (VERSTEEG, 1995):

- projeto, análise, otimização e *scale-up* de equipamentos industriais;
- planejamento e gestão de recursos hídricos;

- análise e simulação de lançamento de poluentes e contaminantes em correntes hídricas e no solo;
- aerodinâmica de veículos terrestres e aeroespaciais;
- projeto de sistemas de propulsão e de geração de energia em geral;
- climatização de construções, entre muitos outros.

A fluidodinâmica computacional é uma ferramenta amplamente utilizada em projeto, pesquisa e desenvolvimento na indústria de processos, pois permite explorar diferentes possibilidades (configurações, dimensões, condições operacionais) antes mesmo de construir ou operar um determinado equipamento de interesse, resultando em uma considerável redução no tempo e nos custos envolvidos no dimensionamento e análise do mesmo. Deve-se ressaltar que a validação dos resultados destas simulações com dados experimentais são extremamente importantes nestes estudos.

As simulações de fluidodinâmica computacional são aplicadas a uma região do espaço do sistema físico onde ocorrem os principais fenômenos de interesse. Este espaço, no qual as equações de transporte são resolvidas, é denominado de domínio computacional. Este domínio é discretizado por meio da construção de uma malha computacional, que consiste na subdivisão do domínio em pequenos volumes/nós discretos, conforme ilustrado na Figura 3. Baseado na malha gerada, as equações diferenciais parciais governantes são então discretizadas, gerando um sistema de equações algébricas, que ao serem resolvidas, resultam no valor das variáveis associadas a cada um destes volumes/nós. A discretização das equações diferenciais governantes podem ser realizadas a partir de diversos métodos, destacando-se o método dos volumes finitos, o método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos (SHAW, 1992).

As malhas podem ser de natureza estruturada ou não estruturada (Figura 4). Uma malha não estruturada é aquela para a qual não há uma regra aparente de formação. As principais vantagens de uma malha não estruturada estão na facilidade para adaptação da mesma a geometrias complexas e para a concentração de volumes em regiões desejadas, reduzindo assim o número total de volumes no domínio. Já para as malhas estruturadas a conexão entre os pontos é facilmente estabelecida por uma regra e a solução de sistemas lineares é facilitada devido à natureza das matrizes resultantes (BORTOLI, 2000).

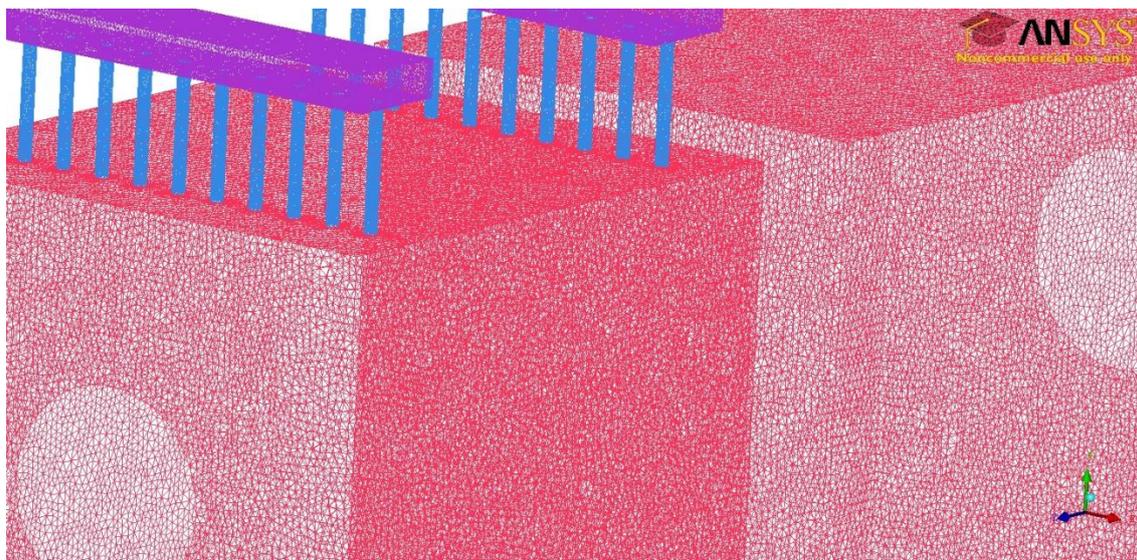


Figura 3 - Exemplo de uma malha computacional não estruturada para uma câmara de pós-combustão

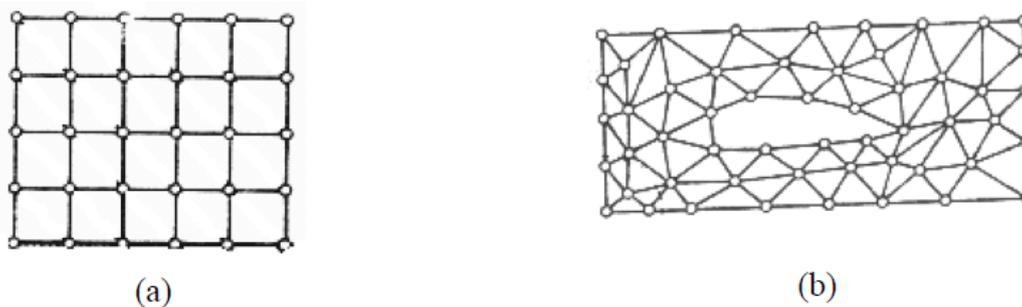


Figura 4 - Malha estruturada (a) e não-estruturada (b). Fonte: (SHAW, 1992)

De uma forma geral, uma simulação de fluidodinâmica computacional divide-se em três etapas sequenciais:

(a) pré-processamento, que consiste na definição do domínio computacional, geração da malha, definição das condições de contorno e iniciais, seleção dos modelos de turbulência e combustão, definição de parâmetros relativos ao método numérico, entre outras tarefas;

(b) solução do sistema de equações discretizadas;

(c) pós-processamento (tratamento, análise e visualização dos resultados).

A Figura 5 exemplifica essas etapas para o caso do software ANSYS CFX® 13.0, que ainda conta com as ferramentas de geração de geometria e malha.

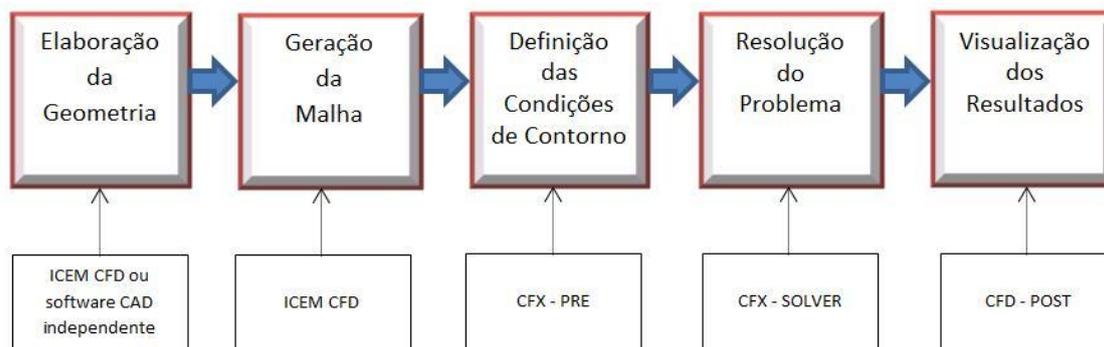


Figura 5 - Estrutura de funcionamento do pacote ANSYS® CFX 13.0

3.5 Análise de câmaras de combustão via CFD

Uma significativa parcela dos trabalhos na área de simulação computacional de processos que envolvam combustão focam principalmente a) na análise de modelos de turbulência que consigam boa descrição do escoamento; b) nos modelos de reação que sejam capazes de descrever realisticamente o termo fonte da equação de transporte das espécies químicas e da energia; e c) nos modelos de radiação robustos que representem adequadamente o termo radiativo na equação da energia sem aumentar demasiadamente o tempo computacional (RONCHETTI, 2008).

Um dos trabalhos mais reconhecidos e citados foi desenvolvido por GARRÉTON e SIMONIN (1994), que publicaram dados experimentais (de temperatura e concentração dos componentes) do estudo da combustão em uma geometria que se assemelha a fornalhas de aquecimento d'água, com admissão de ar e metano coaxialmente. Posteriormente, foram publicados estudos referentes a simulações de processos que apresentam escoamento muito turbulento e instável, como acontece em combustores de turbinas a gás, incineradores e fornos industriais.

MAGEL *et al* (1996), em dois artigos distintos, aplicaram simulação numérica para prever o comportamento da combustão do gás natural dentro de uma câmara cilíndrica, comparando os resultados com aqueles obtidos por GARRÉTON e SIMONIN (1994). Perfis de temperatura e concentração dos componentes ao longo da câmara foram analisados, sendo que no segundo trabalho as reações químicas da combustão com uma chama turbulenta, sem pré-mistura, foram incluídas nas simulações.

NIECKELE *et al* (2001, 2002) desenvolveram estudos da combustão de metano em uma câmara cilíndrica, via fluidodinâmica computacional, comparando seus resultados com os obtidos por MAGEL *et al* (1996a) e GARRÉTON e SIMONIN (1994), respectivamente. O primeiro estudo NIECKELE *et al* (2001) compara diferentes modelos de combustão, sendo o combinado de Arrhenius e Magnussen, E-A, aquele que mais se aproximou dos dados experimentais apresentados por MAGEL *et al*. (1996). O segundo

trabalho (NIECKELE *et al*, 2002) utilizou as equações de Arrhenius e Magnussen, porém o processo de combustão foi analisado em dois cenários: a) a queima do metano sendo descrita por uma única reação global e b) o metano sendo oxidado em duas etapas. Os dados apresentaram boa concordância com os experimentais obtidos por GARRÉTON e SIMONIN (1994).

SILVA (2005), também avaliou via fluidodinâmica computacional os processos de combustão turbulentos para um jato concêntrico de combustível e ar, numa câmara cilíndrica, comparando seus resultados de temperaturas e concentração de espécies com os dados de GARRÉTON e SIMONIN (1994). Dois modelos de combustão foram comparados, em que um assume taxas instantâneas e outro, taxas finitas das reações químicas. O modelo de taxas finitas, quando resolvido com duas etapas globais de queima, foi o que apresentou melhores resultados, quando comparados com os dados experimentais da bibliografia. O papel desempenhado pela transferência de calor por radiação foi analisado detalhadamente, tendo sido considerado responsável pela homogeneização da temperatura dos gases no interior da câmara.

DALL'AGNOL (2009) simulou a combustão do metano em uma câmara cilíndrica, variando a entrada de ar (paralela ao eixo e com *Swirl*). Os parâmetros analisados foram os perfis de temperatura e a concentração de alguns compostos como gás carbônico, oxigênio, monóxido de carbono e metano, dentro da câmara. A modelagem da combustão foi feita pelo modelo de combustão sem pré-mistura e a turbulência resolvida pelo modelo $k-\omega$ SST. Devido ao modelo de combustão adotado, os resultados não concordaram satisfatoriamente com os da literatura. Neste caso, o ponto de ignição acabava ocorrendo antes do tempo em que ocorre num sistema real, prejudicando toda a predição da distribuição de composição das espécies.

Uma cooperação de diversas universidades alemãs iniciou, em 1984, um projeto denominado TECFLAM (Technical Flames) a fim de melhorar o entendimento dos processos de combustão em câmaras que apresentam escoamentos turbulentos e com pré-mistura entre ar e combustível, além de validar dados de simulações. Assim, foram conduzidos estudos experimentais e computacionais com as mesmas características de câmara e alimentação, com o objetivo de validar a metodologia computacional empregada. Um desses estudos foi guiado por MEIER (2000), que traçou o perfil de temperatura e a distribuição das espécies químicas dentro da câmara. Neste mesmo artigo, foi feita uma comparação dos dados obtidos por fluidodinâmica computacional com os experimentais; porém, não foi observada uma boa concordância dos dados simulados com os experimentais. Somente em trabalhos futuros, com a utilização de diferentes modelos de turbulência e radiação térmica, simulações apresentaram uma concordância com os dados experimentais do mesmo autor (MEIER, 2000).

GOULART (2011) desenvolveu uma planilha em Microsoft Excel® baseada em critérios tradicionais existentes na literatura para dimensionamento de uma câmara de combustão, de acordo com o combustível empregado (inclusive gás de gaseificação de biomassa), acoplada a uma geometria

desenhada no software Solidworks®, cujas dimensões variam de acordo com as células da planilha. Para verificar a afirmação de (LEFEBVRE, 1998), de que quando se calcula as dimensões do combustor com base apenas nas questões relacionadas à fluidodinâmica, frequentemente as reações químicas também estarão asseguradas, GOULART (2011) utilizou o software ANSYS CFX®, aplicando os modelos de turbulência, SST, de combustão, *Eddy Dissipation*, e de radiação, P1. Em geral, os resultados observados pelas simulações foram diferentes daqueles estimados pelos cálculos da metodologia, creditado ao fato de que nas simulações, as equações são resolvidas de forma iterativa em um domínio tridimensional, enquanto aquelas empregadas na metodologia correspondem a uma aproximação unidimensional. O autor também recomendou que as equações da metodologia fossem revistas, de modo a prever o comportamento físico com maior precisão, reduzindo os ajustes necessários conforme revelados pelas simulações.

RONCHETI (2008) simulou numericamente os dois casos de escoamentos reativos aparentemente mais analisados na literatura: a câmara cilíndrica estudada por GARRÉTON e SIMONIN (1994), e a câmara de combustão analisada por MEIER (2000), que apresenta um escoamento muito turbulento e instável. Os modelos implementados mostraram bons resultados para ambos os casos, e a análise dos diferentes modelos de turbulência, radiação e de taxa de reação química mostraram que a mecânica dos fluidos computacional é capaz de prever satisfatoriamente a combustão nesses ambientes de queima.

ANTONIETTI e SILVA (2011) simularam a queima de um gás proveniente de um gaseificador de resíduos de couro em uma câmara de combustão do tipo *plug-flow*, a fim de avaliar as taxas de troca térmica e as taxas de reações químicas do processo, bem como o campo de velocidades e de temperatura no equipamento. Foi utilizado um modelo combinado para o processo de oxidação das espécies químicas que considera a queima em pré-mistura e difusiva, ocorrendo em duas etapas de reações químicas globais. Através deste estudo computacional, foram sugeridas alterações na geometria, quantidade e características do ar de combustão.

Por fim, a diretiva de incineração de resíduos da Inglaterra e do País de Gales (DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD AND RURAL AFFAIRS, 2009), para fins de licenciamento, aceita simulações computacionais da fluidodinâmica do processo para prever o comportamento das câmaras.

4. Metodologia

Uma câmara de pós-combustão, projetada para finalizar a queima do gás gerado por um gaseificador e previamente oxidado na primeira câmara de combustão de um sistema como o apresentado na Figura 2, com capacidade de processamento de 200 kg/h de resíduos de serviço de saúde, teve seu desempenho avaliado através de simulações de fluidodinâmica computacional. Estas simulações foram conduzidas com o objetivo de prever a distribuição de temperatura e concentrações das espécies químicas ao longo do equipamento, assim como determinar a conversão atingida e observar o padrão de escoamento no interior da câmara. A geometria não será comparada com

outras formas construtivas de câmara de pós-combustão por razões limitantes de tempo e pelos objetivos práticos (descritos no item 4.1) que a geometria proposta deve desempenhar.

4.1 Características da câmara de pós-combustão

O projeto da câmara de pós-combustão foi concebido pela equipe de engenheiros da empresa Luftech Soluções Ambientais LTDA e a sua configuração retangular, diferente das tradicionais câmaras de combustão cilíndricas, foi escolhida por proporcionar facilidades construtivas, de manutenção e de transporte, podendo inclusive ser feita *in loco*, para o caso de regiões de difícil acesso e na ausência de mão de obra qualificada. As dimensões internas da câmara de pós-combustão (comprimento, largura e altura) são iguais a 2,8 x 1,0 x 1,5 m, o que a confere uma capacidade volumétrica de 4,2 m³. Ao entrar na câmara, o gás a ser oxidado mistura-se com ar atmosférico, que é injetado por uma tubulação constituída por ventaneiras localizada na parte superior da câmara. A inclinação desta tubulação, em relação à parede lateral é de 90° (Figuras 6 e 7).

A exatos 1120 mm da entrada do gás, na câmara, estende-se uma chicana, que força o gás a passar por uma abertura de 300 mm de altura na parte inferior. O diâmetro do tubo por onde o gás entra é de 380 mm e o diâmetro de cada um dos 20 tubos de admissão de ar, divididos bilateralmente é igual a 22,4 mm. A camada isolante/refratária está representada na figura 6, porém a sua troca térmica não foi considerada.

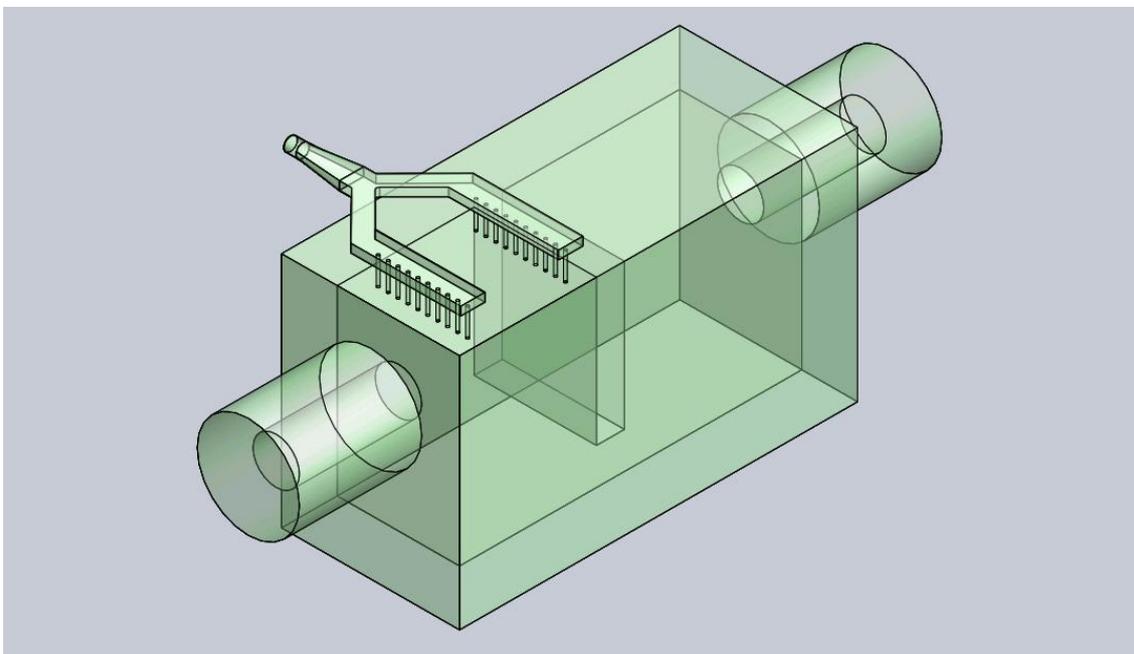


Figura 6 - Câmara de pós-combustão avaliada (vista isométrica)

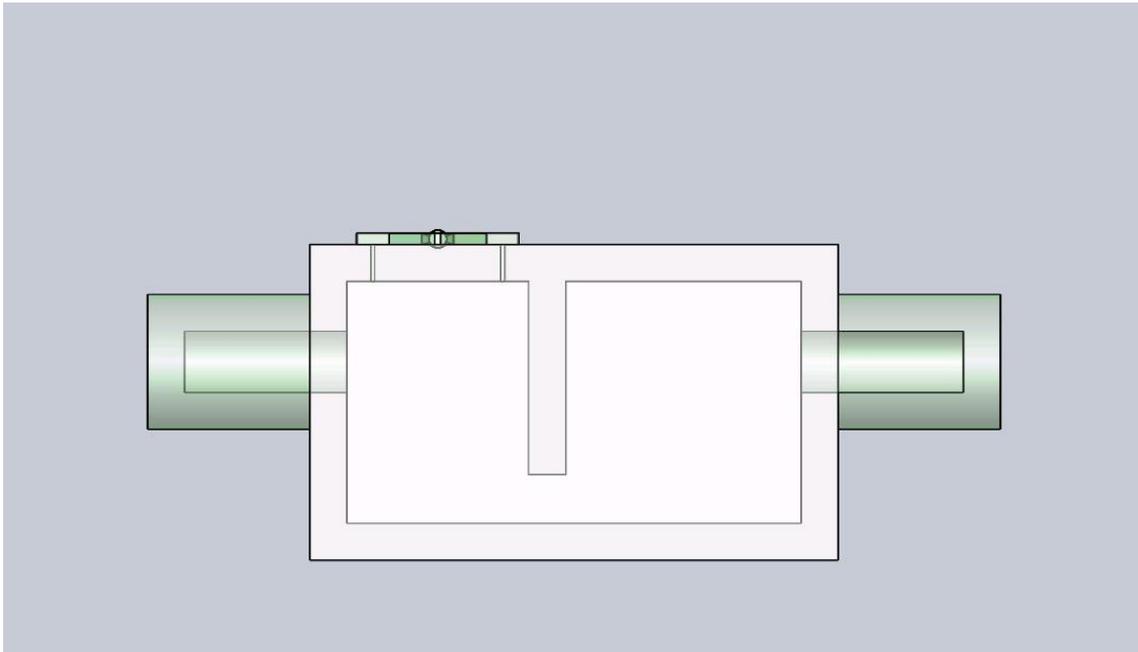


Figura 7 - Câmara de pós-combustão avaliada (vista frontal)

A geometria foi gerada no software Solidworks 2010®, sendo posteriormente exportada para o software de fluidodinâmica computacional utilizado no estudo.

4.2 Modelagem matemática

Para a execução das simulações de fluidodinâmica computacional, foi utilizado o software comercial Ansys CFX® 13.0, na sua versão acadêmica. O CFX, que é baseado na técnica dos volumes finitos, permite a análise de escoamentos sob diversas circunstâncias, sejam laminares ou turbulentos, isotérmicos ou não-isotérmicos, em uma fase ou multifásicos, na presença ou ausência de reações químicas, entre outras possibilidades, sendo integrado a poderosas ferramentas de pré- e pós-processamento, conforme mostrado na Figura 5.

A seguir serão apresentadas as equações governantes do escoamento reativo na câmara de combustão, cuja resolução numérica fornece os campos de velocidade, pressão, temperatura e concentração das espécies químicas envolvidas. Nas simulações conduzidas neste trabalho, considerou-se escoamento em estado estacionário.

4.2.1 Equação da continuidade

A equação 1 representa a conservação da massa total no sistema:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho u_j) = 0 \quad (1)$$

4.2.2 Conservação da quantidade de movimento

As equações de conservação de quantidade de movimento para fluidos newtonianos, também chamadas de equações de Navier-Stokes, que ao serem resolvidas juntamente com a equação 1 levam à determinação do campo de velocidades e pressão, são representadas pela equação (2):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j}\right) + S^{u_i} \quad (2)$$

Onde t é o tempo, ρ e μ correspondem à massa específica e a viscosidade do fluido, respectivamente, x_j são as variáveis espaciais x, y e z . Os termos u_i são os componentes do vetor velocidade, que são separados em um componente médio e um componente variável com o tempo, quando o escoamento é turbulento (conforme descrito em 4.2.5)

O primeiro termo do lado esquerdo (derivada em relação ao tempo) representa a taxa de acúmulo da propriedade no sistema, associada às condições transientes. Neste trabalho, as simulações realizadas foram em estado estacionário, de forma que este termo é nulo. Analogamente, os termos transientes presentes nas equações 3, 4, 9 e 10 também são nulos. O segundo termo do lado esquerdo corresponde à parcela advectiva, de difícil tratamento numérico. No lado direito encontram-se os termos referentes ao gradiente de pressão e às tensões viscosas, estas expressas pela lei da viscosidade de Newton. O termo fonte S^{u_i} envolvido representa qualquer força de campo presente, como por exemplo, a gravitacional (não relevante no problema em questão).

4.2.3 Conservação da energia

A equação da conservação de energia, que permite obter o campo de temperatura acoplado ao campo de velocidades, pode ser expressa pela equação (3):

$$\rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} + \rho C_p \frac{\partial}{\partial x_j}(u_j T) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left(k_1 \frac{\partial T}{\partial x_j}\right) + S^T \quad (3)$$

onde T é a temperatura, C_p é a capacidade calorífica a pressão constante e k_1 a condutividade térmica do fluido. No lado esquerdo da equação, tem-se respectivamente o termo transiente e o termo associado ao transporte advectivo de calor. No lado direito tem-se o termo associado ao transporte difusivo de calor, e o termo fonte S^T , que representa a geração térmica de energia. Não foram considerados os efeitos de radiação térmica.

4.2.4 Conservação da massa por componente

Para determinar a distribuição da concentração de cada componente i presente no sistema, resolvem-se as seguintes equações, acopladas ao campo de velocidades,

$$\frac{\partial c_i}{\partial t} + \frac{\partial(u_j c_i)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial c_i}{\partial x_j} \right) + S^{c_i} \quad (4)$$

para $i = 1..N-1$, onde N é o número total de componentes no sistema. No lado esquerdo da equação, tem-se respectivamente o termo transiente e o termo associado ao transporte advectivo de massa. No lado direito tem-se o termo associado ao transporte difusivo de massa, e o termo fonte S^{c_i} , que representa o termo associado ao consumo (ou geração) do componente i via reação química.

Para o sistema reacional em estudo, a taxa de geração corresponde à taxa volumétrica de conversão (r_a) do metano (CH_4) e do monóxido de carbono (CO), sendo calculado respectivamente por (ANSYS CFX® 13.0 MANUAL):

$$-r_a = k_0 e^{\frac{-E}{RT}} [CH_4]^{-0,3} [O_2]^{1,3} \quad (5)$$

onde os parâmetros cinéticos são dados por $k_0 = 1,5 \cdot 10^7 \cdot s^{-1}$ e $E = 30 \text{ kcal} \cdot \text{mol}^{-1}$, e

$$-r_a = k_0 e^{\frac{-E}{RT}} [CO]^1 [O_2]^{0,25} [H_2O]^{0,5} \quad (6)$$

onde k_0 igual a $10^{14,6} \cdot \text{mol}^{-0,75} \cdot \text{cm}^{2,25} \cdot s^{-1}$ e $E = 40 \text{ kcal} \cdot \text{mol}^{-1}$

O parâmetro cinético k_0 é chamado de fator pré-exponencial, e E de energia de ativação, de acordo com a dependência da constante cinética com a temperatura descrita pela equação de Arrhenius. A taxa é negativa em ambos os casos, pois ambas as espécies são consumidas. Estas expressões para taxa de reação estão associadas às seguintes reações de oxidação do metano e do monóxido de carbono:



4.2.5 Modelos de turbulência

Turbulência são flutuações espaciais e temporais no campo de escoamento. É um processo complexo, principalmente por ocorrer em três dimensões e em variadas escalas, além de ser instável. A turbulência ocorre quando as forças de inércia, no fluido, começam a ser significativas quando comparadas às forças viscosas. Pode ter um efeito significativo nas características do escoamento e é caracterizada por elevados números de Reynolds (ANSYS CFX® 13.0 MANUAL).

A princípio, as equações de Navier-Stokes (2, 3 e 4) descrevem o escoamento turbulento sem a necessidade de variáveis auxiliares. Contudo, escoamentos turbulentos com elevados número de Reynolds envolvem uma grande variação de escalas de tempo e comprimento turbulento, muitas vezes

menores do que a menor malha de volumes finitos aplicável para análises numéricas. Assim, para prever os efeitos da turbulência, foram desenvolvidos diversos modelos de turbulência estatísticos, que resolvem um conjunto de equações de transporte modificadas pela introdução de componentes médios e flutuantes. Desta maneira, a velocidade u_i , nas equações 2, 3 e 4, é separada em um componente médio, \bar{u}_i , e um componente variável com o tempo, U_i , conforme a equação 7.

$$u_i = \bar{u}_i + U_i \quad (7)$$

O componente médio é calculado pela equação 8:

$$\bar{u}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} u_i dt \quad (8)$$

Onde Δt é uma escala de tempo grande em relação às flutuações turbulentas mas pequena em relação à escala de tempo em que cada equação é resolvida.

Os modelos de turbulência mais comumente utilizados são: o modelo $k-\varepsilon$, RNG $k-\varepsilon$, SST - *Shear Stress Model* e RSM - *Reynolds Stress Model*, que devem ser empregados de acordo com as condições de contorno do problema físico em estudo, mediante validações com dados experimentais (GOULART, 2011).

O modelo de turbulência adotado no teste de malha foi o $k-\omega$, que resolve duas equações de transporte, uma para a energia cinética turbulenta, k , e uma para a frequência turbulenta, ω , conforme descrito nas equações 9 e 10:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j k) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \beta' \rho k \omega + P_{kb} \quad (9)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j \omega) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\omega} \right) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + P_{\omega b} \quad (10)$$

As constantes $\beta' = 0,09$, $\beta = 0,075$ e $\alpha = 5/9$ são parâmetros típicos do modelo de turbulência, bem como $\sigma_k = 2$ e $\sigma_\omega = 2$, os quais são os números de Prandtl para a energia cinética e frequência turbulenta, respetivamente. O termo P_k corresponde a taxa de produção de turbulência, que é calculada para fluidos incompressíveis por meio da equação 11:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (11)$$

Para a análise da câmara sem o queimador, foi adotado o modelo SST (Shear Stress Transport), que é baseado no modelo $k-\omega$, porém possui uma melhor aproximação para casos de descolamento da camada limite e alguns casos de camada cisalhante livre, por levar em conta o efeito do transporte da tensão cisalhante (descrição matemática detalhada encontrada em ANSYS CFX® 13.0 MANUAL).

4.3 Condições de contorno e parâmetros de simulação

As condições de contorno usadas na modelagem da câmara de combustão estão descritas a seguir:

- A vazão do gás combustível alimentado ao equipamento foi de 2880 kg/h, composto de H₂O, N₂, CO, CO₂, e CH₄, sendo a composição da mistura mostrada na Tabela 5. Os dados de vazão e composição desta corrente de alimentação foram fornecidos pela empresa Luftech Soluções Ambientais, que possui uma biblioteca digital com dados de amostras coletadas em seus equipamentos. Sua temperatura de admissão na câmara é de 950°C.

Tabela 5 - Composição do gás combustível

Componente	Fração mássica	Vazão mássica (kg/h)
H ₂ O	0,076	218,88
N ₂	0,572	1647,36
CO	0,062	178,56
CO ₂	0,23	662,40
CH ₄	0,06	172,80
Total	1	2880

- Para o ar atmosférico foi assumida a composição em massa igual a 23% O₂ e 77% N₂ na temperatura de 25°C, sendo admitido numa vazão mássica de 6027 kg/h, que contém o dobro do oxigênio estequiométrico necessário para que as reações de oxidação ocorram de forma completa.
- Foram assumidas as condições de não deslizamento nas paredes e ausência de troca térmica.
- A pressão de referência foi a atmosférica.

No teste de malha foi adotado o critério de convergência RMS (*root mean square*) dos valores residuais, sendo o menor valor adotado igual a 1×10^{-6} , porém quando as outras equações (referentes a transferência de calor e massa) foram incluídas no sistema, o critério foi suavizado para 1×10^{-4} , por questões de tempo e custo computacional. Este é um valor de convergência considerado suficiente para a obtenção de um entendimento semi-quantitativo dos campos de escoamento e é capaz de resolver muitos problemas de engenharia (ANSYS CFX® 13.0 MANUAL).

5 Resultados

5.1 Testes de malha

Os primeiros cálculos de convergência para o teste de malha foram realizados em uma câmara de igual configuração àquela descrita nas Figuras 6 e 7, diferenciando-se apenas por possuir um queimador de gás natural numa parede lateral (Figura 8), injetando o fluido na direção do ponto de mistura gás-ar.

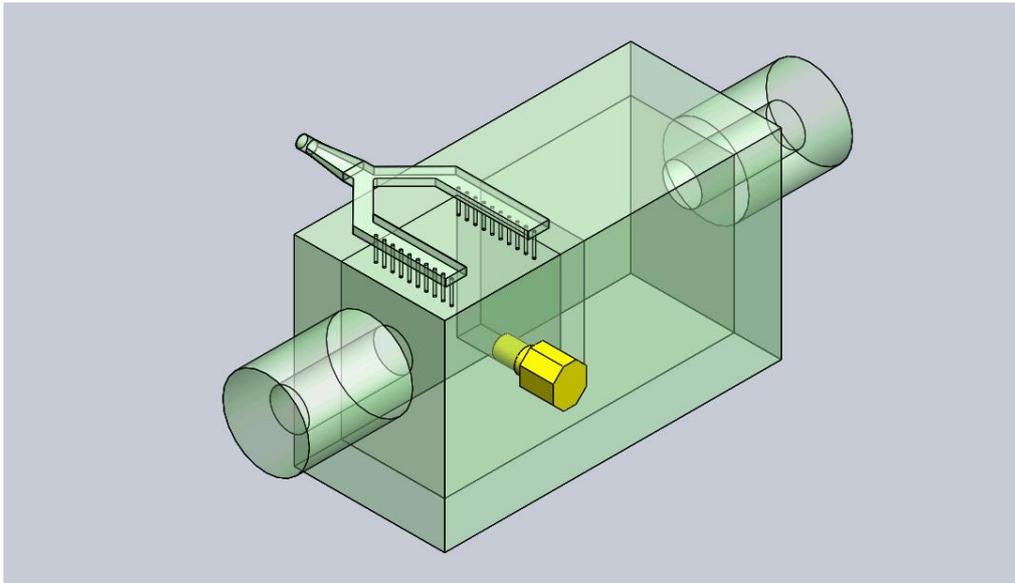


Figura 8 - Geometria da câmara de pós-combustão com o queimador

O modelo de turbulência adotado para o teste de malha foi o $k-\omega$, descrito na seção 4.2.5. Foram rodadas simulações, utilizando-se malhas não estruturadas baseadas em tetraedros e prismas conforme ilustrada na Figura 3, sem levar em conta a transferência de calor e na ausência de reações químicas. Os parâmetros para cada malha utilizada, com diferentes graus de refinamento, são descritos na Tabela 6.

Tabela 6 - Parâmetros para cada malha testada

Malha	N° de prismas	N° de tetraedros	N° total de elementos
Malha 1	0	1037163	1037163
Malha 2	545877	504207	1050084
Malha 3	767715	1807008	2574723
Malha 4	995340	3155445	4150785

Uma solução é considerada independente da malha quando esta não varia consideravelmente quando comparada a outras obtidas em uma malha com um número maior de elementos. É de praxe em análises via CFD, refinar a malha até que os resultados das simulações não mais variem de forma significativa.

Um parâmetro usado para a análise da dependência da solução na malha foi a queda de pressão total no sistema; esta foi calculada em simulações usando as malhas descritas na Tabela 6, sendo os resultados mostrados na Figura 9.

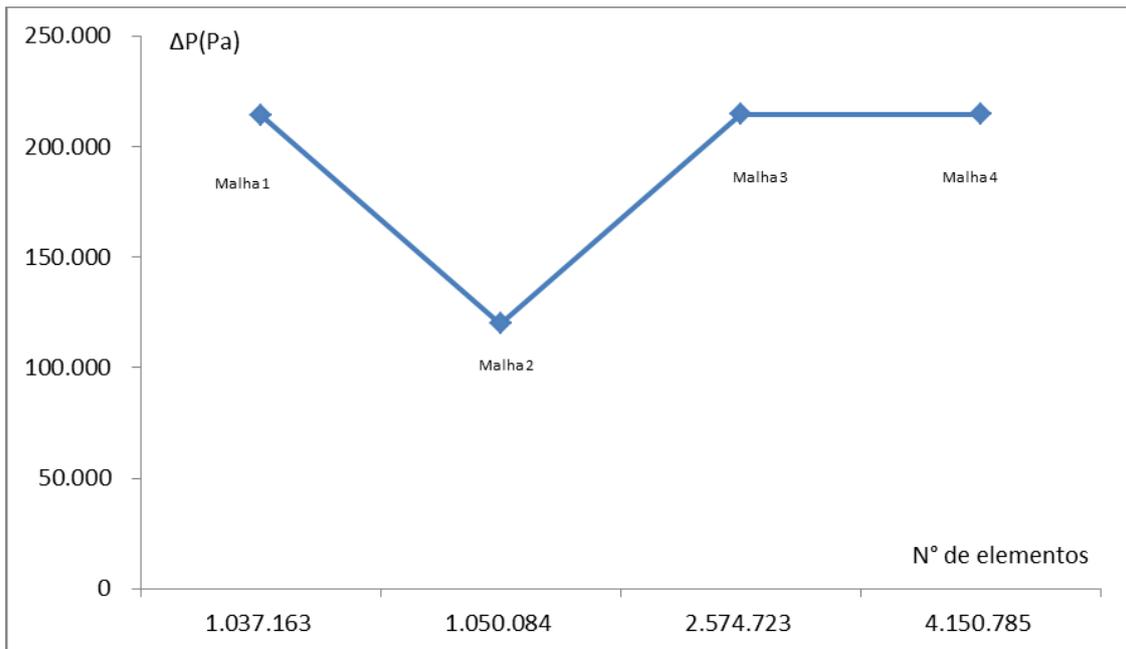


Figura 9 - Teste de convergência de malha através da queda de pressão total no equipamento

Percebe-se que da Malha 3 para a Malha 4 os resultados não variam de forma expressiva, embora o tempo computacional para simulação usando-se a Malha 4 seja superior ao daquele empregado quando se trabalha com a Malha 3. Por isso adotou-se a Malha 3 como referência. As Figuras 10 e 11 mostram linhas de velocidade constante em um plano de corte paralelo aos tubos de entrada e saída, localizado exatamente no centro do equipamento (500 mm), e perfis de velocidade tomados ao longo de uma reta gerada na metade do comprimento do tubo de entrada do gás, pertencente ao mesmo plano de corte. A semelhança entre os resultados das Malhas 3 e 4 observados nas Figuras 10 e 11 é evidente.

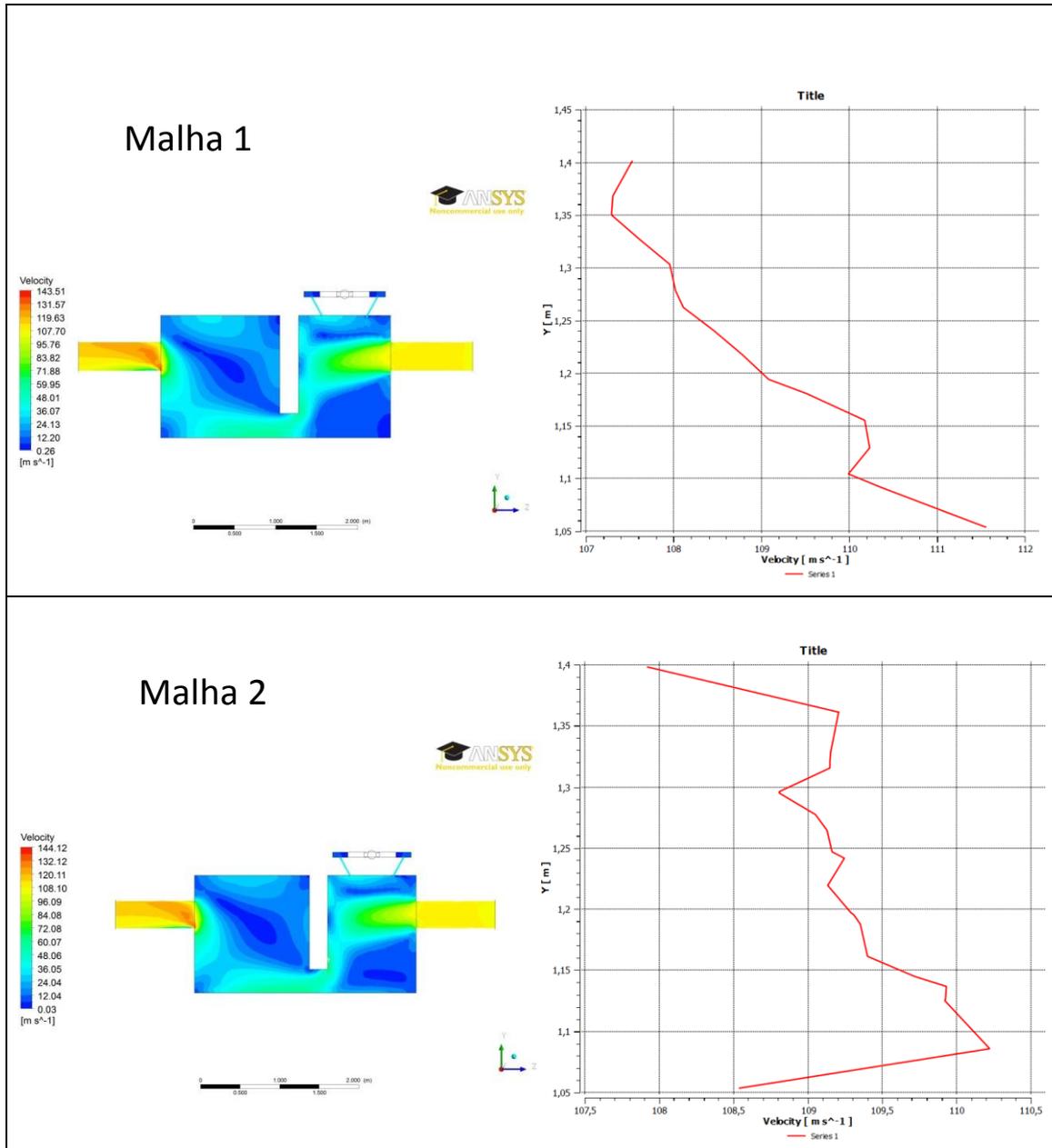


Figura 10 - Linhas de velocidade constante em um plano de corte central e perfil de velocidade na metade do comprimento do tubo de entrada, no mesmo plano de corte central, para malhas 1 e 2.

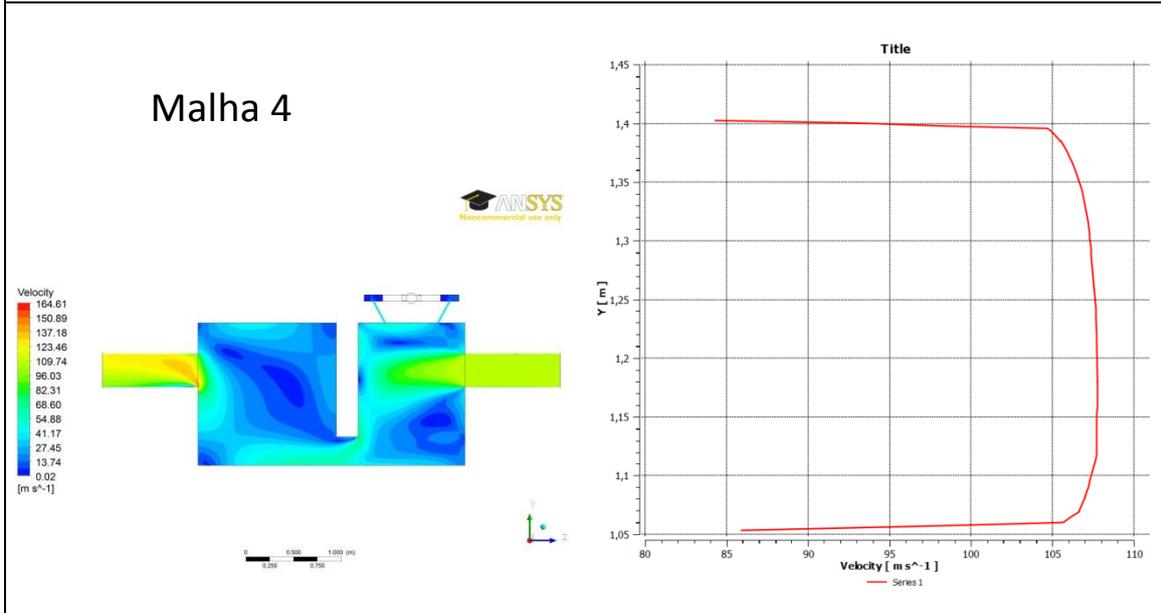
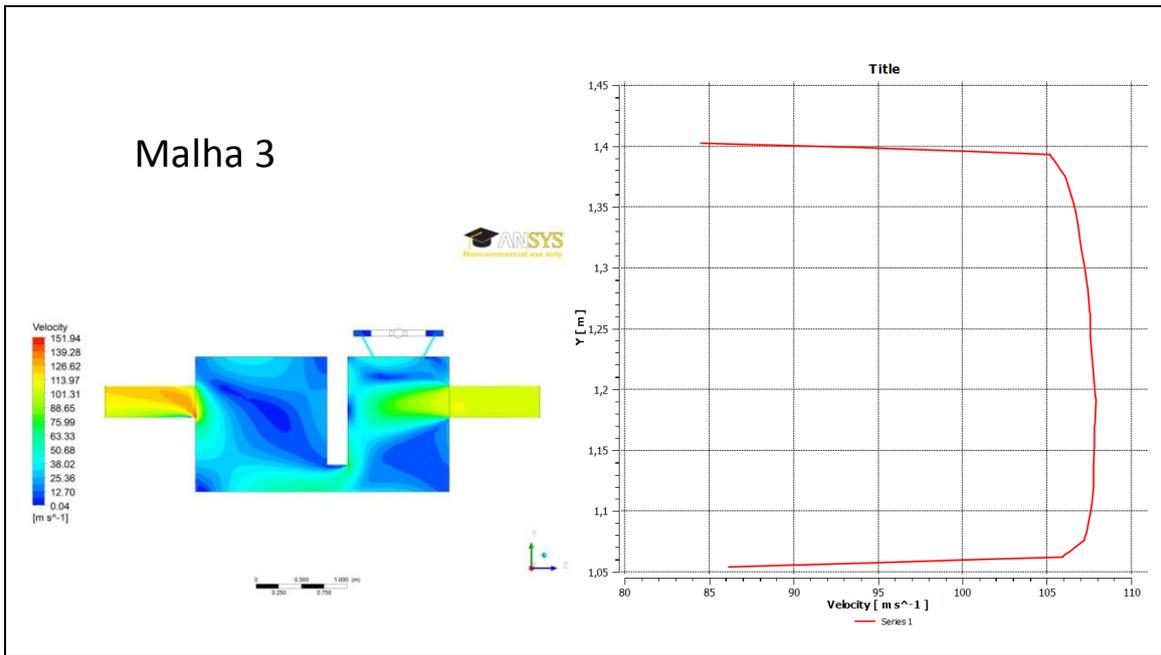


Figura 11 - Linhas de velocidade constante em um plano de corte central e perfil de velocidade na metade do comprimento do tubo de entrada, no mesmo plano de corte central, para malhas 3 e 4.

Ao adicionar a ocorrência de reações químicas no modelo, o critério de convergência (10^{-6}) não mais foi atingido. Sendo assim, o problema foi simplificado pela remoção da geometria do queimador, o que se justifica por dois motivos: o queimador se faz necessário principalmente por questões a) de normas e b) intermitentes:

a) A resolução Conama 316 de 2002, em seu art. 17, inciso Segundo, decreta que o sistema só pode iniciar a operação após a temperatura da câmara secundária atingir a temperatura de oitocentos graus Celsius. Ou seja, o processo aqui em estudo (com o gás parcialmente oxidado) não estaria ocorrendo. Além disso, no inciso primeiro do mesmo artigo exige-se que a câmara secundária (neste estudo chamada de pós-combustão) nunca deve operar abaixo de 800°C .

b) A câmara foi projetada para que a temperatura de 950°C fosse mantida pelas reações do gás de combustão (intrínsecas ao seu poder calorífico). Porém, quando a temperatura está abaixo de 950°C (temperatura de projeto) o queimador é acionado, igualando-se as condições de projeto às condições de contorno utilizadas.

Os tubos de entrada e de saída do gás também foram suprimidos da geometria, uma vez que o estudo volta-se para o interior da câmara. Os orifícios, porém, foram mantidos do mesmo tamanho.

Para a geometria em estudo, sem o queimador, foi gerada uma malha (Tabela 7) com as características da Malha 3 quanto ao número de elementos e o refinamento em forma de prismas nas paredes e nas admissões de gás e ar, a fim de melhor capturar a camada limite. Sua convergência foi testada pela simulação, também com critério RMS de 1×10^{-6} , e rodada com o modelo de turbulência SST-k-omega (ANSYS CFX® 13.0 MANUAL), que é um modelo mais adaptado para geometrias que possuem altos gradientes de pressão e velocidades, como por exemplo, geometrias com anteparos.

Tabela 7 - Número de elementos da malha utilizada nas simulações

Malha	N° de prismas	N° de tetraedros	N° total de elementos
Malha 5	847452	1460046	2.307.498

Para esta malha, a simulação convergiu satisfatoriamente (1×10^{-6}), por isso foi selecionada para execução da análise completa, envolvendo transferência de calor e massa, na presença de reações químicas descritas na seção 4.2.4. Porém, não foram conduzidos novos testes com outras malhas, a fim de se verificar a independência dos resultados, pelo fato da remoção do queimador não representar uma importante alteração geométrica, frente ao tamanho e complexidade da câmara.

5.2 Análise da câmara de pós-combustão

Em geral, o estudo mostra que a câmara de pós-combustão analisada apresenta altas taxas de oxidação do metano e do monóxido de carbono, convertendo quase toda a sua totalidade em dióxido de carbono e água.

A Tabela 8 mostra as vazões mássicas de entrada e na saída dos componentes que têm as suas concentrações alteradas, através das reações de combustão no interior da câmara. As conversões calculadas para os gases alimentados a câmara (CH₄ e CO) são mostradas na Tabela 9. As Figuras 12 e 13 ilustram este comportamento para o caso do metano, através de linhas de concentração constante em diferentes planos de corte.

Tabela 8 - Vazões das correntes de gases na entrada e na saída da câmara

Componente	Vazão mássica (kg/h) ENTRADA	Vazão mássica (kg/h) SAÍDA
CH ₄	172,80	0,00138
CO	178,56	0,00561
CO ₂	662,40	1684,8

Tabela 9 - Conversão dos gases combustíveis

Componente	Vazão mássica (kg/h) ENTRADA	Vazão mássica (kg/h) SAÍDA	Taxa de conversão
CH ₄	172,80	0,00138	99,999%
CO	178,56	0,00561	99,997%

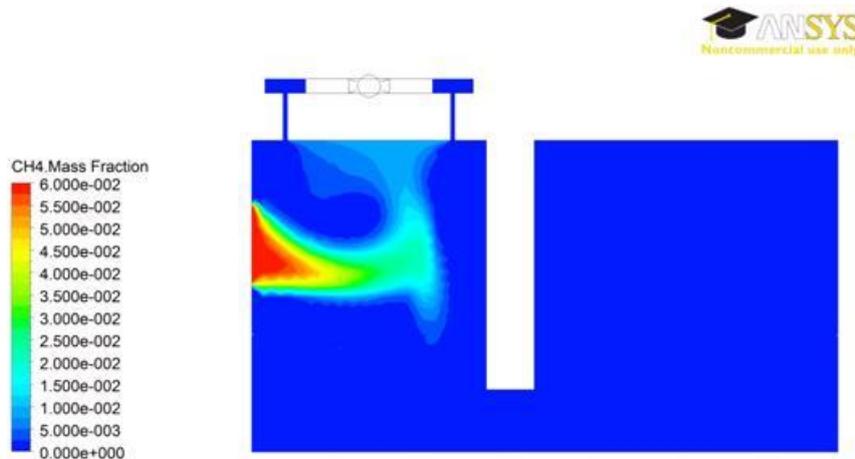


Figura 12 - Linhas de concentração constante de gás metano (CH₄) em um plano gerado na metade da largura da câmara (500mm), ilustrando o consumo do mesmo

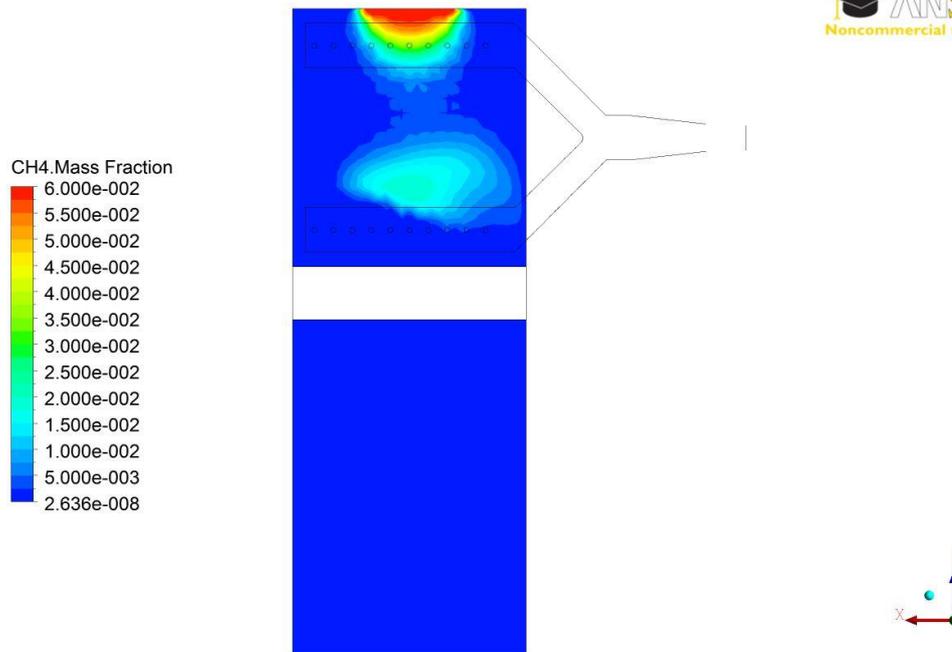


Figura 13 - Linhas de concentração constante de gás metano (CH₄) em um plano gerado na à 1250 mm da base da câmara, ilustrando o consumo do mesmo

Ao analisar as Figuras 12 e 13, percebe-se que o metano é praticamente todo consumido ainda no primeiro compartimento, antes de passar pela chicana. A cortina de ar formada pela segunda bateria de ventaneiras (na Figura 12, a segunda da esquerda para a direita) parece impedir, por gerar uma zona de alta pressão, que o metano prossiga para a próxima câmara sem antes ter reagido com o oxigênio.

A Tabela 10 apresenta as temperaturas estimadas para diversos pontos de interesse na câmara.

Tabela 10 - Temperaturas em diferentes pontos da câmara

	Temperatura (°C)
gás na Entrada	950
ar de combustão	25
máxima atingida	1692,7
gás na Saída	1297,2

O consumo do metano na região localizada entre as cortinas de ar, visualizado pelas Figuras 12 e 13, é também observado pela distribuição de temperatura mostrada nas Figuras 14 e 15. A Figura 14 mostra linhas de temperatura constante ao longo de um plano de corte gerado na metade da largura da câmara (500mm) e a Figura 15 mostra superfícies de temperatura constante na primeira parte da câmara; pode-se notar claramente que as zonas de temperatura elevada, associadas à ocorrência das reações exotérmicas de oxidação, estão localizadas justamente entre as duas injeções de ar, onde o metano é praticamente todo consumido. Além de criar um ambiente propício à

queima, as cortinas de ar ajudam no resfriamento das paredes laterais do refratário. Porém, as imagens revelam que uma atenção especial deverá ser dada a superfície refratária na parte superior da câmara, onde ocorrerão as temperaturas mais elevadas.

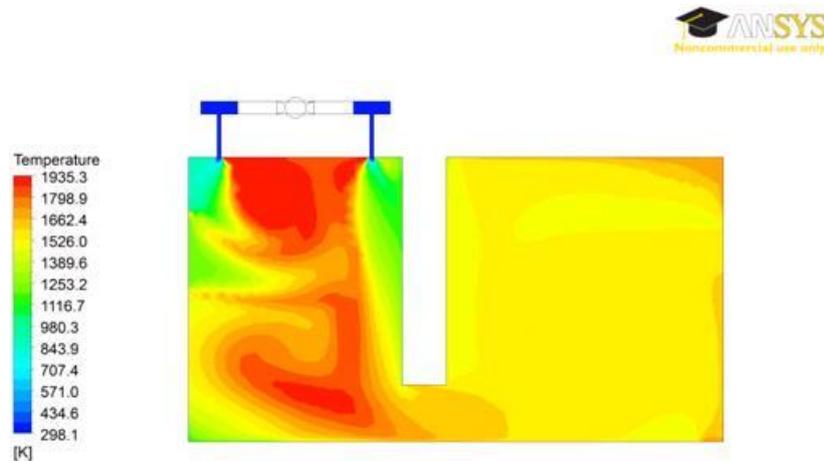


Figura 14 - Temperaturas no interior da câmara, tomadas em um plano gerado na metade da largura da câmara (500 mm)

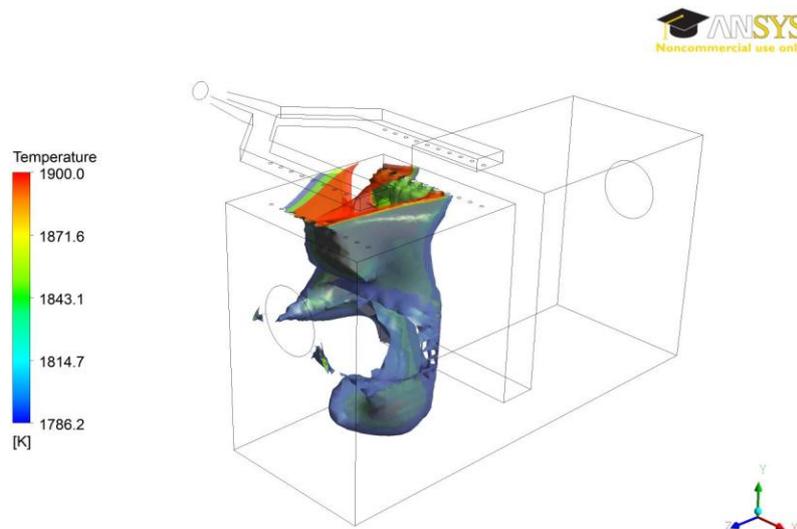


Figura 15 - Superfícies de temperatura constante, no primeiro compartimento da câmara

As altas temperaturas verificadas estão ligadas às altas taxas de conversão do metano e do monóxido de carbono, condições estas que demonstram uma queima eficiente. Este fato nos faz crer que o comburente (ar) pode ser injetado na temperatura ambiente, uma vez que melhores resultados de temperatura e queima não seriam esperados a partir do pré-aquecimento do ar.

Deve-se ressaltar que neste estudo não foram considerados os efeitos associados à radiação de calor, que levariam a um aumento nas temperaturas previstas. Outro fato importante a ser ressaltado é que a presença de material

particulado foi desconsiderada. Estes elementos absorvem calor, diminuindo assim, a temperatura do gás no interior da câmara. Aconselha-se ainda o acoplamento de uma válvula na tubulação de injeção de ar, para controle da temperatura interna da câmara, aproveitando-se do fato de que o ar não será aquecido.

A heterogeneidade da alimentação é uma constante na incineração de resíduos de saúde, contudo as concentrações de metano e de monóxido de carbono utilizadas nas simulações foram extremas, para que se verificasse a capacidade de queima da câmara para altas cargas de gases combustíveis.

Uma velocidade elevada do escoamento de ar alimentado tende a arrastar a chama para o final da câmara (GOULART, 2011). Assim, a eficiente mistura entre comburente e combustível é de extrema importância para que uma boa combustão ocorra. As altas velocidades de escoamento encontradas, conforme ilustrado na Figura 16, não parecem causar nenhum efeito negativo à queima.

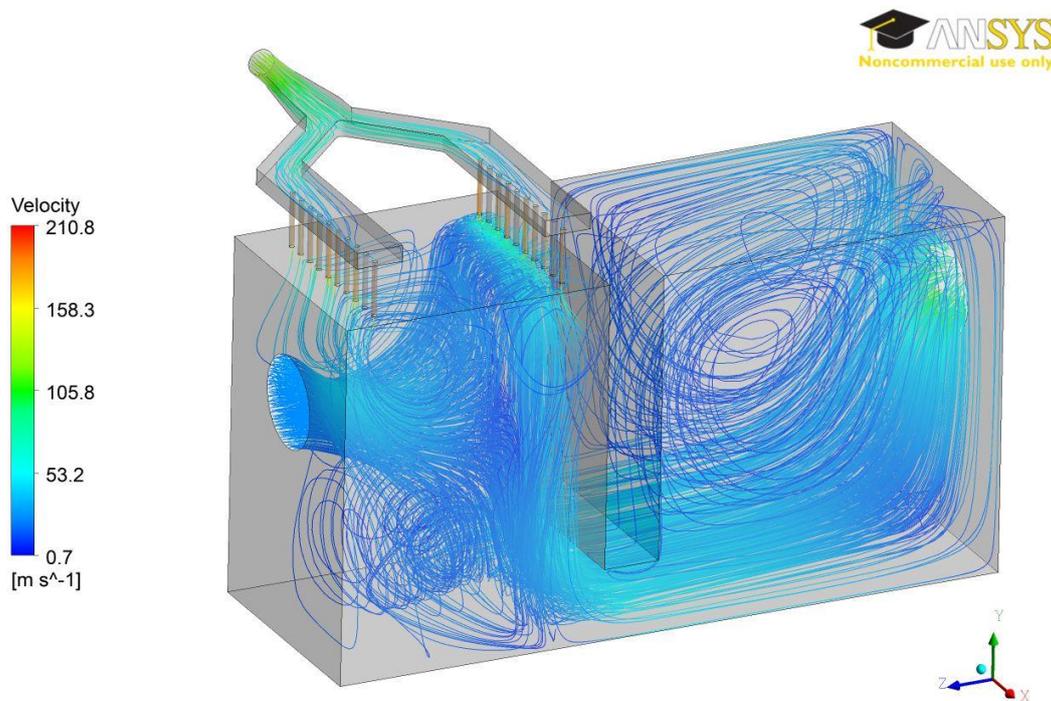


Figura 16 - Linhas de corrente do escoamento, normalizadas de acordo com a velocidade local

Apesar das simulações indicarem que a câmara é capaz de oxidar o combustível em quase toda a sua totalidade, conforme exigência da legislação (CONAMA 316), o tempo que o gás permanece dentro da geometria também foi estimado. Linhas de corrente de escoamento tomadas a partir da entrada do equipamento, normalizadas de acordo com o tempo de residência dentro do mesmo, são apresentados na Figura 17.

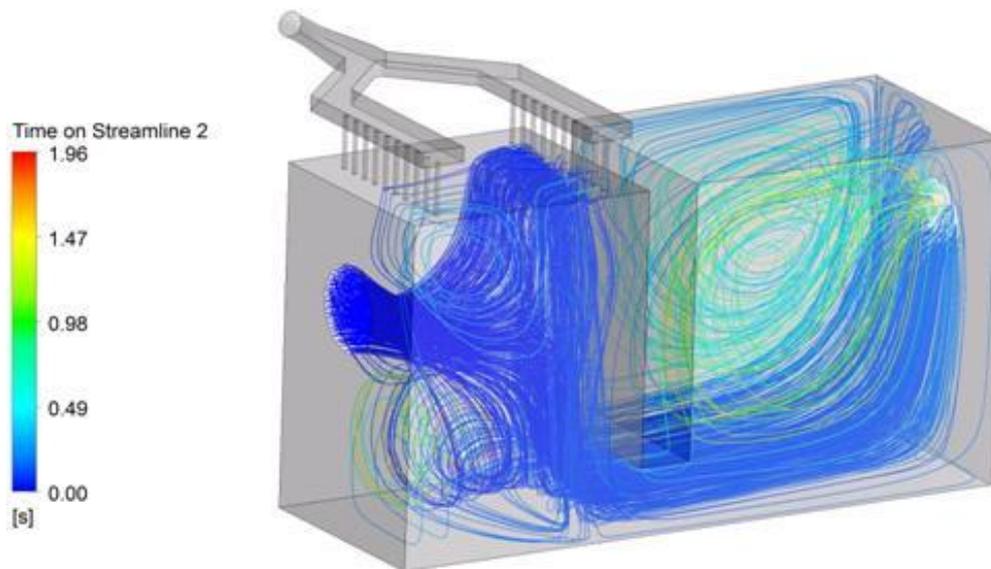


Figura 17 - Linhas de corrente tomadas a partir da entrada, normalizadas conforme tempo de residência no interior do equipamento

Cabe ressaltar que a simulação foi conduzida em estado estacionário, por isso os valores apresentados na Figura 17 são considerados como medidas semi-quantitativas da distribuição do tempo em que o gás permanece dentro da câmara, cujo valor de projeto, definido de modo a atender as diretrizes legais (CONAMA 316), é de 1,5 segundos.

6 Conclusões

A simulação de fluidodinâmica computacional do escoamento reativo em uma câmara de combustão se mostrou como uma ferramenta de grande utilidade na análise do desempenho deste tipo de equipamento. No estudo apresentado, foi observado que os gases combustíveis atingem níveis de oxidação superiores a 99,99% ainda na primeira parte na câmara, que concentra as reações químicas entre as duas cortinas de ar. Assim, a câmara mostrou-se capaz de atingir uma conversão completa do gás, apesar da sua configuração simples e de fácil construção e manutenção, mantendo a temperatura dentro dos níveis desejados. Além do mais, os resultados mostram que atenção especial deve ser dada ao refratário da parte superior da câmara, onde foram verificadas as regiões de temperaturas mais elevadas no processo. Aconselha-se a instalação de uma válvula na tubulação de injeção de ar, tomando-se proveito de que este não é aquecido, para controle da temperatura interna da câmara, caso esta se eleve a níveis indesejados. Foi observado também, que o ar na condição de oxidante, pode ser injetado à temperatura ambiente sem que a queima seja prejudicada. Isto fez com que a equipe responsável pelo projeto da câmara real abandonasse a ideia de aquecê-lo antes de ser inserido ao processo, o que gerou uma considerável redução na previsão dos custos de construção da câmara.

7 Sugestões para trabalhos futuros

Apesar das simulações terem fornecido respostas satisfatórias, elas podem ser melhoradas através de uma série de fatores relacionados às etapas de modelagem e simulação numérica do processo. Um exemplo é a inclusão de outras espécies químicas de interesse prático, tais como tolueno, hidrogênio e cianureto de hidrogênio (sintetizado na presença de calor e catalisador), cujas concentrações dentro do gás costumam ser na ordem de dez vezes inferiores às de metano e monóxido de carbono. Um modelo cinético mais detalhado, que descreva as reações de formação e destruição das dioxinas contribuiria para o enriquecimento dos resultados quantitativos.

A inclusão do fenômeno de radiação térmica no modelo pode gerar diferenças na predição da distribuição de temperatura no interior da câmara, sendo aconselhado que este seja considerado em simulações futuras.

Um refinamento da malha certamente permitiria a obtenção de resultados de melhor qualidade, permitindo uma melhor comparação quantitativa com resultados reais.

Como a alimentação da incineração de resíduos de saúde não é homogênea, a condução de simulações com diferentes composições e/ou temperatura da corrente de entrada permitiria a análise do comportamento da câmara frente a variações em relação às condições de operação de projeto. Seria interessante também analisar a operação transiente da câmara, com o objetivo de avaliar o comportamento do processo em procedimentos de partida, e frente a perturbações nas condições de alimentação, detectando assim possíveis problemas e permitindo propor modificações adequadas.

Por fim, propõe-se também fazer a validação do modelo estudado com a operação da câmara em escala industrial.

Referências Bibliográficas

ANSYS ® CFX 13.0 MANUAL

ANTONIETTI, A. J. ; SILVA, C. V. **Simulação numérica dos processos de combustão de combustíveis gasosos: gás de gaseificação de resíduo de biomassa ($C_7H_8+CH_4+H_2+CO+HCN$)**. Vivências: Revista Eletrônica de Extensão da URI. Vol. 7, nº 12, p. 136-152. Maio, 2011.

ANVISA. Ministério da Saúde; Agência Nacional de Vigilância Sanitária. **Manual de gerenciamento de resíduos de serviços de saúde**. Brasília, 2006. 182 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11175: Incineração de resíduos sólidos perigosos – Padrões de desempenho**.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de Agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Casa Civil, Subchefia para Assuntos Jurídicos.

BRASIL. Resolução da Diretoria Colegiada nº 306, de 07 de Dezembro de 2004. **Dispõe sobre o Regulamento Técnico para o gerenciamento de resíduos de serviço de saúde**. Diretoria Colegiada da Agência Nacional de Vigilância Sanitária - ANVISA.

BRASIL. Resolução nº 05, de 05 de Agosto de 1993. **Dispõe sobre o gerenciamento de resíduos sólidos gerados nos portos, aeroportos, terminais ferroviários e rodoviários**. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.

BRASIL. Resolução nº 283, de 12 de Julho de 2001. **Dispõe sobre o tratamento e destinação final dos resíduos dos serviços de saúde**. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.

BRASIL. Resolução nº 358, de 29 de Abril de 2005. **Dispõe sobre o tratamento e a disposição final dos resíduos dos serviços de saúde**. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.

BRASIL. Resolução nº 316, de 29 de Outubro de 2002. **Dispõe sobre procedimentos e critérios para o funcionamento de sistemas de tratamento térmico de resíduos**. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA.

BORTOLI. Á. L. de. **Introdução à Dinâmica de Fluidos Computacional**. 1ª ed. Porto Alegre: Ed. Universidade/UFRGS, 2000.

BUNDESGESETZBLATT I. **Siebzehnte Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes (Verordnung über die Verbrennung**

und die Mitverbrennung von Abfällen - 17. BImSchV). Página 1633, Alemanha, 14 de Agosto de 2003.

CALDERONI, S. **Os bilhões perdidos no lixo.** 3ª ed. São Paulo: Humanitas, 1999.

CHANDLER, A. J. and ASSOCIATES LTD. **Review of Dioxins and Furans from Incineration.** In Support of a Canada-wide Standard Review, 2006. 216 p.

CONFERÊNCIA DAS NAÇÕES UNIDAS SOBRE O MEIO AMBIENTE E O DESENVOLVIMENTO. **Agenda 21.** Rio de Janeiro, 1992.

DALL'AGNOL; A. **Simulação numérica do processo de combustão de metano em um queimador cilíndrico.** Trabalho de conclusão de curso de Engenharia Mecânica. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil, Porto Alegre, 2010.

DELAWARE SOLID WASTE AUTHORITY. **Waste to Energy Compared to Fossil Fuels for Equal Amounts of Energy.** Delaware, Estados Unidos, 2008. Disponível em:

DEPARTMENT FOR ENVIRONMENT, FOOD AND RURAL AFFAIRS. **Environmental Permitting Guidance – The Directive on the Incineration of Waste.** For the Environmental Permitting (England and Wales) Regulations 2007. Versão 2. Inglaterra, 2009.

FEDERAL MINISTRY FOR THE ENVIRONMENT, NATURE CONSERVATION AND NUCLEAR SAFETY OF GERMANY. **Waste Incineration – A Potential Danger? Bidding Farewell to Dioxin Spouting.** Alemanha, 2005. 9 p.

GANDOLLA, M. **Tratamento dos Resíduos de Serviço de Saúde.** In: SEMINÁRIO SOBRE TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS DE SERVIÇO DE SAÚDE. Brasília, 1997.

GARRÉTON, D. ; SIMONIN, O. **Aerodynamics and steady state combustion chamber and furnances.** ECOFTAC Bulletin, 1994. p 29-38.

GODINHO, M. **Gaseificação e combustão de resíduos sólidos da indústria calçadista.** Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais (PPGEM), Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Brasil, Porto Alegre, 2006.

GOULART, F. L. D. **Projeto preliminar e simulação computacional de câmara de combustão de turbina a gás considerando a queima de biocombustíveis.** Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá. Brasil, Itajubá, 2011.

IPT/CEMPRE. **Lixo Municipal: Manual de Gerenciamento Integrado**. São Paulo, Publicação IPT 2622, 2000.

LEFEBVRE, A. H. **Gas Turbine Combustion**. 2ª ed. Estados Unidos da América: Taylor and Francis Group, 1998.

LIMA, L. M. Q. **Tratamento de Lixo**. 2ª ed. São Paulo: Hemus, 1991.

MAGEL, H. C. ; SCHNEIDER, R. ; SCHNELL, U. ; HEIN, K. R. G. **Modeling of hydrocarbon and nitrogen chemistry in turbulent combustor flows using detailed reaction mechanisms**. 3rd Workshop on Modeling of Chemical Reaction Systems. Heidelberg, 1996a.

MAGEL, H. C. ; SCHNEIDER, R. ; SCHNELL, U. ; HEIN, K. R. G. **Simulation of detailed chemistry in a combustor flow**. Twenty-Sixth Symposium (International) and Combustion. The Combustion Institute, 1996b. p. 67-74.

MEIER, W. **Investigations in the TECFLAM swirling diffusion flame: Laser Raman measurements and CFD calculations**. Applied Physics B Laser and Optics, vol. 71. Alemanha, 2000. p 725-731.

MINISTÉRIO DA SAÚDE, (2001). **Gerenciamento de resíduos de serviços de saúde**. Brasília, 120p.

NIECKELE, A. O. ; NACCACHE, M. F. ; GOMES, M. S. P. ; CARNEIRO, J. E. ; SERFATY, R. **Evaluation of models for combustion process in a cylindrical furnace**. ASME-IMECE, International Conference of Mechanical Engineering. Nova Iorque, 2001.

NIECKELE, A. O. ; NACCACHE, M. F. ; GOMES, M. S. P. ; CARNEIRO, J. E. ; SERFATY, R. **Predição da combustão de gás natural em uma fornalha utilizando reação em uma e duas etapas**. CONEM. Brasil, João Pessoa, 2002.

NIESSEN, W. R. **Combustion and Incineration Process**. 4ª ed. Nova Iorque: Marcel Dekker Inc, 2010.

PNSB. Ministério do Planejamento, Orçamento e Gestão; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro, 2010. 219 p.

REMÉDIOS DOS REIS, J. F. **Eliminação de dioxinas em cinzas volantes com nanopartículas de ferro**. Dissertação de Mestrado. Universidade Nova de Lisboa, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Química. Lisboa, 2009.

RENEWABLE ENERGY ASSOCIATION. **Energy from Waste**. Reino Unido. <<http://www.r-e-a.net/renewable-technologies/energy-from-waste>> Acessado em 18/10/2012.

RENOSAM; RAMBOLL. **Waste to energy in Denmark, the most efficient waste management system in Europe.** Dinamarca, 2006.

RONCHETTI, B. **Simulação numérica da combustão de metano em câmara cilíndrica utilizando o cfx 10.0.** Dissertação de mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2008.

SHAW, C. T. **Using Computational Fluid Dynamics.** Department of Engineering. University of Warwick, Prentice Hall, 1992.

SILVA, C. V. da. **Simulação numérica da combustão turbulenta de gás natural em câmara cilíndrica.** Tese de doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil, 2005.

SMEDBERG, M. **Evaluation of Fluidized bed furnace and Moving grate furnace for Incineration of Municipal Waste.** Department of Chemical Engineering, Lund Institute of Technology, 2009.

SUIÇA. Office Fédéral de la Santé Publique. Division Principale de Médecine. **Analyse des méthodes d'élimination des déchets infectieux hospitaliers: Rapport d'Étude: État février.** SUIÇA: [s.n.], 1994, 33 p.

THE BLUE RIDGE ENVIRONMENTAL DEFENSE LEGUE. **Waste Gasification - Impacts on the Environment and Public Health.** Carolina do Norte, Estados Unidos, 2009.

UNILABS ENVIRONMENTAL. **Characterisation and Estimation of Dioxin and Furan Emissions from Waste Incineration Facilities.** Austrália, 1999.

VERSTEEG, H. K. ; MALALASEKERA, W. **An introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method.** England: Longman Scientific and Technical, 1995.