

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
**CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA**

**EFEITOS DA ALTERAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS  
NAS EMISSÕES E DISPERSÃO ATMOSFÉRICA DE  
SO<sub>2</sub> DE CALDEIRAS EM REFINARIA DE BAUXITA**

**David Braga Fernandes**

Orientadores:

Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves

Prof. Dr. André Luiz Fiquene de Brito

Campina Grande - Paraíba

---

2012

DAVID BRAGA FERNANDES

EFEITOS DA ALTERAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS NAS EMISSÕES E DISPERSÃO  
ATMOSFÉRICA DE SO<sub>2</sub> DE CALDEIRAS EM REFINARIA DE BAUXITA

Dissertação apresentada à Universidade  
Federal de Campina Grande como parte dos  
requisitos exigidos para a obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Química.

Orientadores:

Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves

Prof. Dr. André Luiz Fiquene de Brito

Campina Grande - Paraíba

2012



FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCC

F363e

Fernandes, David Braga.

Efeito da alteração de combustíveis nas emissões e dispersão atmosférica de SO<sub>2</sub> de caldeiras em refinaria de bauxita / David Braga Fernandes. - Campina Grande, 2012.

78 f. : il. Color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia.

"Orientação: Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves, Prof. Dr. André Fiquene de Brito".

Referências.

1. Dióxido de Enxofre. 2. Caldeiras. 3. Fluidodinâmica Computacional.  
I. Alves, José Jailson Nicácio. II. Brito, André Fiquene. III. Título.

CDU 66.02(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA  
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO  
DO ALUNO DAVID BRAGA FERNANDES

Titulo: Efeitos da Alteração de Combustíveis nas Emissões e  
Dispersão

COMISSÃO EXAMINADORA

CONCEITO

Prof. José Jailson Nicacio Alves (Doutor)

APROVADO

(Orientador)

Prof. André Luiz Fiquene de Brito (Doutor)

Aprovado - A.L.F.B.

(Orientador)

Prof. Romildo Pereira Brito (Doutor)

APROVADO

(Examinador Interno)

Prof. Júlio Inácio de Holanda T. Neto (Doutor)

Aprovado -

(Examinador Externo)

Campina Grande, 29 de junho de 2012

**DAVID BRAGA FERNANDES**

**EFEITOS DA ALTERAÇÃO DE COMBUSTÍVEIS NAS EMISSÕES E DISPERSÃO  
ATMOSFÉRICA DE SO<sub>2</sub> DE CALDEIRAS EM REFINARIA DE BAUXITA**

Dissertação apresentada à Universidade  
Federal de Campina Grande como parte dos  
requisitos exigidos para a obtenção do  
título de Mestre em Engenharia Química.

Aprovada em: 29 / 06 / 2012.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves  
Orientador - UFCG

Prof. Dr. André Luiz Fiquene de Brito  
Orientador - UFCG

Prof. Dr. Romildo Pereira Brito  
Examinador - UFCG

Prof. Dr. Júlio Inácio de Holanda Tavares Neto  
Examinador Externo - UFAL

Aos meus pais, Edilvagna e Sobrinho.

À minha irmã, Daniela.

À minha esposa, Flávia.

À minha filha, Júlia.

## **AGRADECIMENTOS**

À DEUS, por nutrir a essência do meu projeto de vida, tornando meu projeto uma realidade;

Aos Professores da Universidade Federal de Campina Grande, pelos ensinamentos, amizades, incentivos e confiança durante o curso;

Ao Consórcio de Alumínio do Maranhão, em especial para Hézio Oliveira e Dulcimar Soares, pelo o incentivo e apoio;

Aos meus orientadores, em especial ao Professor José Jailson Nicácio Alves, pela amizade, confiança e grande apoio que foram essenciais para o desenvolvimento desse trabalho;

Ao Professor Antônio Tavernard Pereira Neto, pela disponibilidade e orientações sobre CFX;

A todos aqueles que embora não tenham sido mencionados contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Aos meus familiares e amigos que contribuíram para minha formação pessoal e profissional.

*“O valor de uma vitória reside no significado da luta.” (Roberto Shinyashiki)*



## RESUMO

O dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) na atmosfera tem diversos efeitos nocivos à saúde humana, à vegetação e ao meio ambiente. A emissão de dióxido de enxofre está principalmente relacionada à combustão de combustíveis de origem fóssil, como o carvão mineral e os derivados de petróleo, contendo enxofre, tanto em automóveis quanto em instalações industriais. As caldeiras de geração de vapor e eletricidade representam significativa parcela das emissões de SO<sub>2</sub> no ambiente industrial. A alteração de combustíveis desses equipamentos consiste em um dos principais métodos de controle da poluição. A avaliação dos efeitos desse método na dispersão e concentração de SO<sub>2</sub> no nível do solo através de simulações computacionais proporciona menor tempo, baixo custo e maior segurança nas decisões relacionadas às mudanças na matriz energética de equipamentos. O objetivo deste trabalho é utilizar a fluidodinâmica computacional para simular a dispersão atmosférica de emissões de SO<sub>2</sub> das três caldeiras Babcock & Wilcox avaliando as concentrações do poluente a nível solo, de forma a orientar estudos técnicos voltados a mudanças na matriz energética fóssil dos equipamentos. O Software de fluidodinâmica computacional ANSYS Workbench - FluidFlow (CFX) foi utilizado para o desenvolvimento da geometria do domínio, da malha computacional, condições de contorno, solução computacional e avaliação de resultados de seis cenários. Em todos os cenários simulados a convergência ocorreu após o processo alcançar a meta de resíduo de  $1e^{-4}$  para Momento, Massa, Transferência de Calor, Turbulência e Fração Mássica de SO<sub>2</sub> no domínio. Os resultados do Cenário 1 (padrão) se aproximaram do modelo Calpuff desenvolvido no Estudo de Impacto Ambiental de Expansão do Empreendimento. Os resultados das simulações indicaram que em condições de atmosfera neutra a completa dispersão atmosférica da pluma de SO<sub>2</sub> proveniente das caldeiras alcançou o desempenho ideal no nível do solo a partir da substituição parcial ou total do combustível capaz de reduzir 25% do enxofre nas emissões. Dessa forma, a utilização de Biomassa de eucalipto ou babaçu, materiais abundantes na região, além da utilização de carvões minerais com menor concentração de enxofre, se apresenta como alternativa que deve ter sua viabilidade técnica e econômica estudada.

Palavras-chave: Dióxido de Enxofre. Caldeiras. Fluidodinâmica Computacional.

## ABSTRACT

Sulphur dioxide (SO<sub>2</sub>) in the atmosphere has several harmful effects on human health, vegetation and the environment. The emission of sulfur dioxide is mainly related to the combustion of fossil fuels such as coal and petroleum products containing sulfur, both in cars and industrial facilities. The boilers generate steam and electricity represent a significant portion of SO<sub>2</sub> emissions in the industrial environment. Changing fuels such equipment is one of the main methods of pollution control. The evaluation of the effects of this method in the dispersion and concentration of SO<sub>2</sub> at ground level by means of simulation provides less time, lower cost and greater safety in decisions related to changes in the energy equipment. The objective of this work is to use computational fluid dynamics to simulate the atmospheric dispersion of emissions of SO<sub>2</sub> from three Babcock & Wilcox boilers evaluating the concentrations of pollutant at ground level, so as to guide technical studies aimed at changes in fossil energy matrix of the equipment. The computational fluid dynamics software, ANSYS Workbench - Fluid Flow (CFX), was used for the development of the geometry of the domain, the computational mesh, boundary conditions, solution and results evaluation for six scenarios. In all scenarios simulated convergence occurred after the process of achieving the target residue of 1e<sup>-4</sup> to Momentum, Mass, Heat Transfer, Turbulence and Mass Fraction of SO<sub>2</sub> in the domain. The results of Scenario 1 (default) approached the CALPUFF model developed in the Environmental Impact Study for Expansion of Industrial Plant. The simulation results indicated that under neutral atmosphere occurred a complete atmospheric dispersion of the plume of SO<sub>2</sub> from the boiler achieved optimal performance at ground level from the partial or total replacement of the fuel able to reduce 25% of sulfur emissions. Therefore, the use of biomass of Eucalyptus or Babaçu Palm, abundant materials in the region, besides the use of mineral coal with lower sulfur concentration, are an alternative that should have its technical and economic feasibility study.

Keywords: Sulfur Dioxide. Boilers. Computational Fluid Dynamics.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Gráfico da disponibilidade de nutrientes no solo em função do pH (Malavolta, 1979). .14	14
Figura 2 - Concepção esquemática de uma unidade de dessulfuração de gases de combustão. (SPONK, 2012) .....	18
Figura 3 - Ilustração de resultados de um modelo baseado em Fluidodinâmica Computacional (ARIA Technologies, 2012) .....	26
Figura 4 - Fluxograma de Processo da Refinaria para a Produção de Alumina. (CATUNDA, 2004) .....	28
Figura 5 - Imagem de Satélite apresentando a localização da Área de Estudo. (Google Earth, 2012) .....	35
Figura 6 - Ilustrações do Domínio construído no <i>ANSYS DesignModeler</i> . .....	37
Figura 7 - Ilustrações da Malha construída no <i>ANSYS ICEM CFD Meshing</i> .....	37
Figura 8 - Ilustração do processo de configuração do modelo com condições de contorno realizado no <i>ANSYS CFX-Pre</i> . .....	40
Figura 9 - Gráficos dos resíduos calculados para Momento, Massa e Transferência de Calor no Cenário 1, gerados através do <i>ANSYS CFX-Solver Manager</i> . .....	41
Figura 10 - Gráficos dos resíduos calculados para Turbulência e Fração Mássica de SO <sub>2</sub> no Cenário 1, gerados através do <i>ANSYS CFX-Solver Manager</i> . .....	41
Figura 11 - Concentração à nível do solo da dispersão de SO <sub>2</sub> no Cenário 1 gerado através do <i>ANSYS CFD-Post</i> . .....	42
Figura 12 - Plano com uma Isosurface representando a pluma de dispersão em 3D do Padrão Primário no Cenário 1 gerado através do <i>ANSYS CFD-Post</i> .....	42
Figura 13 - Gráficos dos resíduos calculados para Momento, Massa e Transferência de Calor no Cenário 2, gerados através do <i>ANSYS CFX-Solver Manager</i> . .....	43
Figura 14 - Gráficos dos resíduos calculados para Turbulência e Fração Mássica de SO <sub>2</sub> no Cenário 2, gerados através do <i>ANSYS CFX-Solver Manager</i> . .....	43
Figura 15 - Concentração à nível do solo da dispersão de SO <sub>2</sub> no Cenário 2 gerado através do <i>ANSYS CFD-Post</i> . .....	44
Figura 16 - Plano com uma Isosurface representando a pluma de dispersão em 3D do Padrão Primário no Cenário 2 gerado através do <i>ANSYS CFD-Post</i> .....	44
Figura 17 - Gráficos dos resíduos calculados para Momento, Massa e Transferência de Calor no Cenário 3, gerados através do <i>ANSYS CFX-Solver Manager</i> . .....	45
Figura 18 - Gráficos dos resíduos calculados para Turbulência e Fração Mássica de SO <sub>2</sub> no Cenário 3, gerados através do <i>ANSYS CFX-Solver Manager</i> . .....	45

Figura 19 - Concentração à nível do solo da dispersão de SO <sub>2</sub> no Cenário 3 gerado através do <i>ANSYS CFD-Post</i> .....	46
Figura 20 - Plano com uma Isosurface representando a pluma de dispersão em 3D do Padrão Primário no Cenário 3 gerado através do <i>ANSYS CFD-Post</i> .....	46
Figura 21 - Gráficos dos resíduos calculados para Momento, Massa e Transferência de Calor no Cenário 4, gerados através do <i>ANSYS CFX-Solver Manager</i> .....	47
Figura 22 - Gráficos dos resíduos calculados para Turbulência e Fração Mássica de SO <sub>2</sub> no Cenário 4, gerados através do <i>ANSYS CFX-Solver Manager</i> .....	47
Figura 23 - Concentração à nível do solo da dispersão de SO <sub>2</sub> no Cenário 4 gerado através do <i>ANSYS CFD-Post</i> .....	48
Figura 24 - Plano com uma Isosurface representando a pluma de dispersão em 3D do Padrão Primário no Cenário 4 gerado através do <i>ANSYS CFD-Post</i> .....	48
Figura 25 - Gráficos dos resíduos calculados para Momento, Massa e Transferência de Calor no Cenário 5, gerados através do <i>ANSYS CFX-Solver Manager</i> .....	49
Figura 26 - Gráficos dos resíduos calculados para Turbulência e Fração Mássica de SO <sub>2</sub> no Cenário 5, gerados através do <i>ANSYS CFX-Solver Manager</i> .....	49
Figura 27 - Concentração à nível do solo da dispersão de SO <sub>2</sub> no Cenário 5 gerado através do <i>ANSYS CFD-Post</i> .....	50
Figura 28 - Plano com uma Isosurface representando a pluma de dispersão em 3D do Padrão Primário no Cenário 5 gerado através do <i>ANSYS CFD-Post</i> .....	50
Figura 29 - Gráficos dos resíduos calculados para Momento, Massa e Transferência de Calor no Cenário 6, gerados através do <i>ANSYS CFX-Solver Manager</i> .....	51
Figura 30 - Gráficos dos resíduos calculados para Turbulência e Fração Mássica de SO <sub>2</sub> no Cenário 6, gerados através do <i>ANSYS CFX-Solver Manager</i> .....	51
Figura 31 - Concentração à nível do solo da dispersão de SO <sub>2</sub> no Cenário 6 gerado através do <i>ANSYS CFD-Post</i> .....	52
Figura 32 - Plano com uma Isosurface representando a pluma de dispersão em 3D do Padrão Primário no Cenário 6 gerado através do <i>ANSYS CFD-Post</i> .....	52
Figura 33 - A esquerda, figura adaptada de CATUNDA (2004) com representação da poligonal da área. A direita, concentração à nível do solo da dispersão de SO <sub>2</sub> no Cenário 1 gerado nesse estudo através do <i>ANSYS CFD-Post</i> .....	53
Figura 34 - Gráficos da concentração linear de SO <sub>2</sub> à nível do solo de acordo com a dispersão simulada para os Cenários 1, 3 e 5, gerados através do <i>ANSYS CFD-Post</i> .....	54
Figura 35 - Gráficos da concentração linear de SO <sub>2</sub> à nível do solo de acordo com a dispersão simulada para os Cenários 2, 4 e 6, gerados através do <i>ANSYS CFD-Post</i> .....	54

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação de Estabilidade Atmosférica de Pasquill .....	19
Tabela 2 – Relação entre o expoente ( $n$ ) para o perfil do vento e as classes de estabilidade atmosférica.....	20
Tabela 3 – Propriedades dos Carvões Minerais.....	29
Tabela 4 – Propriedades do Gás Natural .....	30
Tabela 5 – Classificação do Óleo Combustível.....	30
Tabela 6 – Caracterização de qualidade de Biomassas.....	31
Tabela 7 – Composição de Biomassas e Carvão Mineral.....	31

## **LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

Al – Alumínio

C<sub>6</sub>H<sub>14</sub> – Hexano

CBW – Caldeiras Babcock & Wilcox

Cd – Cádmio

CFD – Computational Fluid Dynamics

CH<sub>4</sub> – Metano

CLA – Camada Limite Atmosférica

CONAMA – Conselho Nacional de Meio Ambiente

EPA – Environmental Protection Agency

H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> – Ácido Sulfúrico

Pb – Chumbo

pH – Potencial Hidrogeniônico

S – Enxofre

SO<sub>2</sub> – Dióxido de Enxofre

SO<sub>x</sub> – Óxidos de Enxofre

# SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	14
1.1	Efeitos das Emissões Atmosféricas de Dióxido de Enxofre (SO <sub>2</sub> ).....	14
1.2	Padrões de Qualidade do Ar para SO <sub>2</sub> .....	15
1.3	Principais métodos de controle de emissões do SOx (óxidos de enxofre) .....	17
1.3.1	Controle da concentração de enxofre no combustível .....	17
1.3.2	Dessulfuradores seco/úmidos de gases .....	17
1.3.3	Alteração de Combustíveis.....	18
1.4	Dispersão de Poluentes na Atmosfera .....	18
1.5	Modelagem Matemática da Dispersão de Emissões Atmosféricas.....	20
1.5.1	Modelo de Caixa.....	21
1.5.2	Modelo de Gauss .....	21
1.5.3	Modelos Lagrangianos.....	22
1.5.4	Modelos Eulerianos .....	22
1.5.5	Modelo de Gás Denso.....	23
1.5.6	Fluidodinâmica Computacional.....	23
1.6	Sustentabilidade na indústria de Alumina e Alumínio .....	26
1.7	Refinaria de Bauxita .....	27
1.8	Caldeiras Babcock & Wilcox (CBW).....	28
1.9	Principais Combustíveis Utilizados em Caldeiras .....	29
1.9.1	Carvão Mineral.....	29
1.9.2	Gás natural .....	29
1.9.3	Óleos combustíveis.....	30
1.9.4	Biomassa.....	31
1.10	Descrição do Problema.....	32
2	OBJETIVO.....	33

3	DESENVOLVIMENTO DO MODELO EM FLUIDODINÂMICA COMPUTACIONAL.....	34
3.1	Recursos Utilizados .....	34
3.2	Caracterização da Região de Estudo.....	34
3.2.1	Localização .....	34
3.2.2	Clima e Condições Meteorológicas .....	35
3.2.3	Vegetação e Relevo .....	35
3.3	Desenvolvimento da Geometria do Domínio .....	36
3.4	Geração da Malha Computacional.....	37
3.5	Condições de Contorno .....	37
3.6	Solução Computacional e Resultados.....	40
3.6.1	Cenário 1 - Emissão Atual e Atmosfera Neutra .....	40
3.6.2	Cenário 2 - Emissão Atual e Atmosfera Instável.....	42
3.6.3	Cenário 3 - Emissão -25% Enxofe e Atmosfera Neutra .....	44
3.6.4	Cenário 4 - Emissão -25% Enxofe e Atmosfera Instável .....	46
3.6.5	Cenário 5 - Emissão -50% Enxofe e Atmosfera Neutra .....	48
3.6.6	Cenário 6 - Emissão -50% Enxofe e Atmosfera Instável .....	50
4	ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	53
5	CONCLUSÃO .....	56
	REFERÊNCIAS .....	57
	APÊNDICE – Resultados da Simulação do Cenário 3.....	61



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Efeitos das Emissões Atmosféricas de Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>)

O Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>) é um dos mais comuns poluentes atmosféricos, introduzido no ambiente em grandes quantidades, proveniente tanto de fontes antropogênicas quanto de fontes naturais. Uma vez emitido, o SO<sub>2</sub> pode reagir com vários oxidantes presentes na atmosfera e formar sulfato particulado, na forma de gotas de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> ou na forma de partículas neutralizadas, tais como sulfato de amônio. O processo de oxidação do SO<sub>2</sub> e outras espécies de enxofre (S) ocorre tanto em fase gasosa como também em fase aquosa. Tal processo, além de resultar na formação de sulfato particulado, contribui significativamente para a produção de acidez, comprometendo sobremaneira a qualidade das condições ambientais. (MARTINS & ANDRADE, 2002)

Substâncias emitidas para a atmosfera podem retornar quimicamente transformadas à superfície, via processos de deposição seca (sem a participação da fase líquida), ou deposição úmida. A deposição úmida ocorre através de chuva, orvalho, neblina e neve. O termo chuva ácida tem sido usado frequentemente como uma expressão para todos os processos de deposição úmida. (MARTINS & ANDRADE, 2002)

O interesse científico na deposição úmida tem aumentado como consequência de prejuízos ecológicos e econômicos, tais como danos às florestas, à flora e fauna aquática, e aos materiais de construção. Além de poluir rios e lagos, destruindo a flora e a fauna aquática, a chuva ácida se infiltra no solo, liberando ou disponibilizando na solução do solo metais potencialmente tóxicos (Figura 1), a exemplo Al, Pb, Cd, que podem se introduzir na cadeia alimentar. (MARTINS & ANDRADE, 2002)

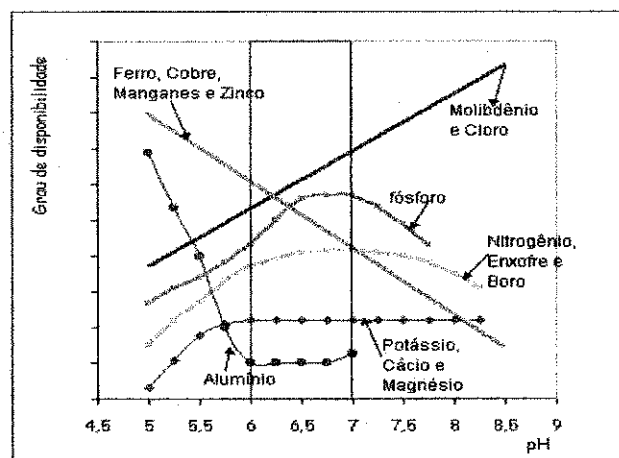


Figura 1 - Gráfico da disponibilidade de nutrientes no solo em função do pH (Malavolta, 1979).

Nos últimos anos, tem se verificado uma relação direta entre danos à vegetação e precipitação ácida. O fenômeno de destruição de florestas foi observado pela primeira vez, em larga escala, na Alemanha. Florestas com elevadas altitudes são as mais afetadas pela precipitação ácida, provavelmente por estarem mais expostas à base de nuvens baixas, onde a acidez é mais concentrada. (MARTINS & ANDRADE, 2002)

O dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) na atmosfera tem diversos efeitos nocivos à saúde humana, à vegetação e a diversos materiais. Estudiosos apontam que altas concentrações de SO<sub>2</sub> estão associadas a aumentos de doenças e mortalidade. A inalação do dióxido de enxofre pode resultar em danos ao sistema respiratório e tecidos pulmonares. Várias catástrofes já ocorreram quando populações foram expostas a altas concentrações de poluentes no ar. Uma delas ocorreu em Londres, ano de 1952, quando 4 mil pessoas morreram devido ao aumento, 7 vezes maior que o nível normal, da concentração de SO<sub>2</sub> no ar, provocado pela queima de combustíveis fósseis na cidade. (HINDRICH & KLEINBACH, 2004)

O SO<sub>2</sub> pode afetar o sistema respiratório e as funções pulmonares, causar irritação nos olhos, inflamação do trato respiratório, provocar tosse, secreção de muco, agravamento de asma e bronquite crônica, além de tornar as pessoas mais propensas a infecções respiratórias. Quando combinado com água forma ácido sulfúrico, que é o principal componente da chuva ácida. (WHO, 2011)

## 1.2 Padrões de Qualidade do Ar para SO<sub>2</sub>

Segundo o Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA), entende-se como poluente atmosférico qualquer forma de matéria ou energia com intensidade e em quantidade, concentração, tempo ou características em desacordo com os níveis estabelecidos, e que tornem ou possam tornar o ar:

- I - impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde;
- II - inconveniente ao bem-estar público;
- III - danoso aos materiais, à fauna e flora.
- IV - prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da comunidade.

Os padrões de qualidade do ar são definidos como as concentrações de

poluentes atmosféricos que, se ultrapassadas, poderão afetar a saúde, a segurança e o bem-estar da população, bem como ocasionar danos à flora e à fauna, aos materiais e ao meio ambiente em geral. Estes padrões possuem duas classes:

I - Padrões Primários de Qualidade do Ar: concentrações de poluentes que se ultrapassadas poderão afetar a saúde da população.

II - Padrões Secundários de Qualidade do Ar: concentrações de poluentes abaixo das quais se prevê o mínimo efeito adverso sobre o bem-estar da população, assim como o mínimo dano à fauna, à flora, aos materiais e ao meio ambiente em geral.

A Resolução nº 003/1990 do CONAMA, estabelece os seguintes Padrões de Qualidade do Ar para o Dióxido de Enxofre (SO<sub>2</sub>):

a) Padrão Primário - concentração média aritmética anual de 80 (oitenta) microgramas por metro cúbico de ar ou concentração média em 24 (vinte e quatro) horas de 365 (trezentos e sessenta e cinco) microgramas por metro cúbico de ar, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

b) Padrão Secundário - concentração média aritmética anual de 40 (quarenta) microgramas por metro cúbico de ar ou concentração média em 24 (vinte e quatro) horas de 100 (cem) microgramas por metro cúbico de ar, que não deve ser excedida mais de uma vez por ano.

Em São Paulo, o Decreto Estadual N. 8468/76 também estabelece padrões de qualidade do ar e critérios para episódios agudos de poluição do ar, mas abrange um número menor de parâmetros. O parâmetro Dióxido de Enxofre em 24h possui nível de Atenção em 800µg/m<sup>3</sup>, de Alerta em 1600µg/m<sup>3</sup> e de Emergência em 2100µg/m<sup>3</sup>. (Estado de São Paulo, 2012)

A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos da América (EPA - *Environmental Protection Agency*) estabeleceu no Padrão Nacional de Qualidade do Ar Ambiente para Dióxido de Enxofre os limites de 75 ppb em 1 hora como Padrão Primário e de 0,5 ppm em 3 horas como Padrão Secundário. (EUA, 2012)

### 1.3 Principais métodos de controle de emissões do SO<sub>x</sub> (óxidos de enxofre)

Os principais métodos utilizados para controle das emissões atmosféricas de SO<sub>x</sub> em equipamentos são: o controle da concentração de enxofre no combustível; a dessulfurização por calcário; e a alteração de combustíveis. (EPA, 2011 & SALOMON, 2003)

#### 1.3.1 Controle da concentração de enxofre no combustível

No controle da concentração de enxofre no combustível, a emissão é reduzida pela utilização do mesmo tipo de combustível com teores menores de enxofre em sua composição química. Também pode se utilizar uma mistura de combustível com altos e baixos teores de enxofre. (SALOMON, 2003)

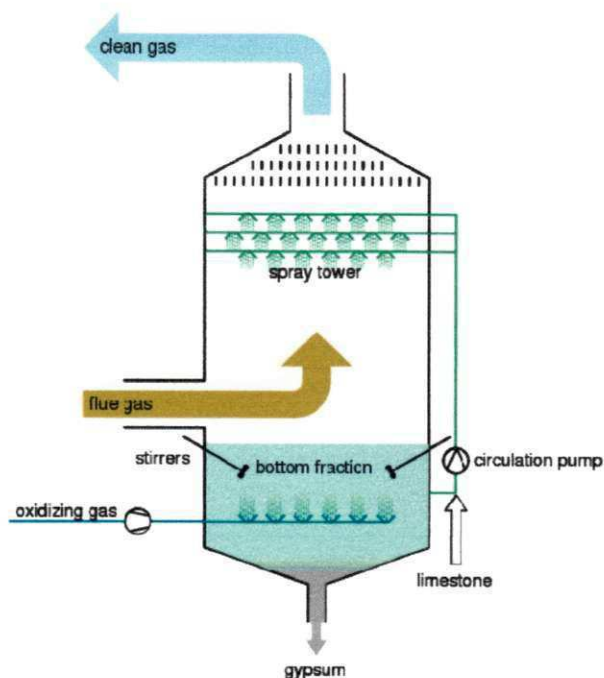
Como exemplo, podemos relacionar a classificação de Óleo diesel regulamentado para uso rodoviário no Brasil (ANP, 2011):

- S10 (teor de enxofre máximo de 10 mg/kg);
- S50 (teor de enxofre máximo de 50 mg/kg);
- S500 (teor de enxofre máximo de 500 mg/kg);
- S1800 (teor de enxofre máximo de 1800 mg/kg).

#### 1.3.2 Dessulfuradores seco/úmidos de gases

A dessulfuração seca de gases envolve pulverizações com uma mistura (seca) altamente atomizada de um reagente alcalino (ex. Cal hidratada) dentro do fluxo de gás quente para absorver SO<sub>2</sub>. Após essa fase, os gases são enviados para um filtro de mangas ou precipitador eletrostático, onde o subproduto de processo, seco, é capturado.

Já o dessulfurador úmido de gases utiliza uma mistura de um líquido alcalino (calcário CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O) introduzido no fluxo do gás através de um lavador para absorver SO<sub>2</sub>, os gases reagem com a suspensão de calcário, formando sulfito de cálcio, posteriormente oxidado a sulfato por meio de aeração. O resíduo sólido originado pode ser utilizado na construção civil, conforme ilustrado na Figura 3. (CORÁ, 2006 & IEA Clean Coal Centre, 2012)



**Figura 2 - Concepção esquemática de uma unidade de dessulfuração de gases de combustão. (SPONK, 2012)**

### 1.3.3 Alteração de Combustíveis

A alteração de combustíveis consiste na conversão de equipamentos para que eles possam funcionar com combustíveis menos poluentes do que aqueles para os quais foram originalmente concebidos, dessa forma um novo combustível com baixa concentração de enxofre reduzirá a emissões de SO<sub>x</sub> na atmosfera. (EPA, 2011).

## 1.4 Dispersão de Poluentes na Atmosfera

A Camada Limite Atmosférica (CLA) é definida como a parte inferior da Troposfera que está sob influência direta da superfície terrestre. Sua espessura depende das condições atmosféricas e é bastante variável no espaço e no tempo, podendo apresentar valores desde centenas de metros até mais de 1 km. Os principais eventos relacionados à dispersão e diluição dos poluentes do ar ocorrem nessa camada. (MARQUES FILHO, 1999)

A turbulência atmosférica é um fator importante na dispersão de poluentes. A geração da turbulência atmosférica é resultante principalmente do escoamento atmosférico turbulento e a velocidade do escoamento, mais precisamente a tensão cisalhante (efeito da

viscosidade) gerada por este escoamento sobre o solo terrestre. Desta forma, os gradientes de temperatura, que geram as forças de empuxo, e os gradientes de velocidade média do escoamento são responsáveis por suprir energia para manter o movimento turbulento.

O principal parâmetro para a caracterização da turbulência, quando esta é dominada por tensão de cisalhamento, é a velocidade de fricção, que é função da velocidade do vento e da rugosidade da superfície. Quando a turbulência é dominada pelas forças de empuxo, a condição de estabilidade atmosférica, e por consequência seu grau de turbulência, é determinada pelo gradiente vertical de temperatura. (PFLUCK, 2010)

A estabilidade atmosférica representa o grau de equilíbrio de uma amostra de ar de volume unitário. A classificação da estabilidade atmosférica para fins de estabelecimento de cenários meteorológicos é um dado fundamental no cálculo da concentração de poluentes. PASQUILL (1961) propôs um sistema de classificação de estabilidade apresentado na Tabela 1, o qual considera a incidência de radiação solar na superfície terrestre, a incidência de nuvens e a velocidade do vento a 10m do solo. Esta classificação é a mais comumente utilizada, em função de sua simplicidade e praticidade.

**Tabela 1 - Classificação de Estabilidade Atmosférica de Pasquill**

Velocidade do Vento a 10m do Solo (m/s)	Incidência de Radiação Solar (W/m <sup>2</sup> )			Fração de Cobertura de Nuvens à Noite	
	>700	350 a 700	<350	>50%	<50%
< 2	A	A-B	B	-	-
2 a 3	A-B	B	C	E	F
3 a 5	B	B-C	C	D	E
5 a 6	C	C-D	D	D	D
>6	C	D	D	D	D

Fonte: Adaptado de PFLUCK (2010). Legenda: A= extremamente instável / B = moderadamente instável / C = fracamente instável / D= neutra / E = fracamente estável / F = moderadamente estável

Na Tabela 1 observamos que: quanto maior a incidência de radiação solar, maior será a radiação absorvida pela superfície e maior será o fluxo de calor entre a mesma e as camadas adjacentes de ar, gerando assim maior empuxo. Já durante a noite, a cobertura de nuvens tende a “aprisionar” o calor na superfície terrestre, dificultando as trocas térmicas e diminuindo a força motriz da transferência de energia; dessa forma, uma atmosfera mais turbulenta é conservada. O vento também é um fator determinante para a geração de instabilidade atmosférica. Normalmente, a dispersão de um determinado poluente é determinada pela direção e intensidade do vento medido no local da fonte e concentração do poluente.



A dispersão de poluentes na atmosfera é determinada pelas forças de empuxo geradas pelo aquecimento das camadas mais baixas de ar através da troca de calor com a superfície terrestre, pela direção e velocidade média do vento, através da tensão de cisalhamento gerada e pelo processo de advecção, na direção horizontal.

O perfil de velocidade do vento pode ser descrito por uma lei de potência expressa pela seguinte equação:

$$\frac{u_2}{u_1} = \left(\frac{Z_2}{Z_1}\right)^n \quad (1.4.A)$$

onde:  $u_1$  e  $u_2$  são as velocidades médias horizontais do vento nas alturas  $Z_1$  e  $Z_2$ , e  $n$  é um expoente que está relacionado com a intensidade da turbulência, rugosidade do solo e com a diferença entre as alturas escolhidas como pontos de referência, de acordo com a Tabela 2. (ROBALLO & FISCH, 2006; PFLUCK, 2010)

**Tabela 2 - Relação entre o expoente ( $n$ ) para o perfil do vento e as classes de estabilidade atmosférica.**

Classe de Estabilidade de Pasquill	Expoente ( $n$ ) para Terrenos Urbanos	Expoente ( $n$ ) para Terrenos Rurais
A	0,15	0,07
B	0,15	0,07
C	0,20	0,10
D	0,25	0,15
E	0,30	0,35
F	0,30	0,55

Fonte: Adaptado de PFLUCK (2010).

Dessa forma, a concentração de um determinado poluente na atmosfera varia no tempo e no espaço em função de reações químicas e/ou fotoquímicas, dos fenômenos de transporte, de fatores meteorológicos (ventos, turbulências e inversões térmicas) e da topografia da região.

### 1.5 Modelagem Matemática da Dispersão de Emissões Atmosféricas

A dispersão de poluentes na atmosfera é objeto de estudo ao longo dos anos, muitas teorias foram propostas, gerando diferentes modelos matemáticos. Tais modelos são desenvolvidos com o objetivo de prever a dispersão e comportamento atmosférico nas camadas influenciadas.

A determinação da concentração de poluentes lançados na atmosfera é um

elemento importante para a previsão de impactos ambientais causados por emissões de efluentes industriais, sendo fundamental na avaliação da viabilidade de novas unidades industriais, ou existentes, relacionados à manutenção ou melhoria dos padrões de qualidade do ar locais (GOMES, 2007). A seguir, serão apresentados alguns modelos matemáticos propostos para tais fins e suas principais características, com ênfase em fluidodinâmica computacional.

### 1.5.1 Modelo de Caixa

O Modelo de Caixa é um dos modelos mais simples, supõe um volume dado do ar atmosférico em forma de uma caixa em uma determinada região geográfica. Supõe também que os poluentes do ar dentro da caixa estão distribuídos de forma homogênea e com isso usa essa suposição para estimar as concentrações médias do poluente em qualquer lugar dentro da caixa. (GOMES, 2007)

### 1.5.2 Modelo de Gauss

O Modelo Gaussiano é baseado em uma fórmula simples que descreve um campo de concentrações tri-dimensional gerado por uma fonte pontual elevada sob condições meteorológicas constantes. As condições de emissão também são consideradas como sendo constantes neste tipo de modelo. Os modelos de pluma gaussiana são largamente utilizados, mas possuem muitas limitações físicas. Uma delas é que o terreno deve ser considerado plano. Esse modelo pode ser derivado da equação de difusão-advecção em situações idealizadas. As concentrações são calculadas a partir da seguinte equação:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi \times u \times \sigma_y \times \sigma_z} \times \exp\left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2}\right) \times \left[ \exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \alpha \times \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right) \right] \quad (1.5.A)$$

onde:  $C(x, y, z)$  é a concentração do poluente à jusante da fonte no ponto  $(x, y, z)$ ,  $x$  a distância horizontal da fonte,  $y$  a distância horizontal do eixo central da pluma,  $z$  altura do solo,  $Q$  vazão mássica de emissão,  $u$  velocidade média do vento,  $H$  altura efetiva da chaminé,  $\alpha$  coeficiente de reflexão,  $\sigma_y$  o coeficiente de dispersão lateral e  $\sigma_z$  o coeficiente de dispersão



vertical. Estes coeficientes são dependentes da estrutura turbulenta da atmosfera. (GOMES, 2007)

### 1.5.3 Modelos Lagrangianos

No esquema lagrangeano formula-se um modelo de trajetórias para o movimento das partículas de fluido. O elemento ou partícula de um fluido é um pequeno volume de controle que viaja na velocidade local do meio fluido. A sua dimensão é grande quando comparada com as escalas moleculares e pequena em relação a menor escala de movimento, a microescala de Kolmogorov. As partículas movem-se seguindo os vórtices turbulentos, descrevendo trajetórias aleatórias. A equação Lagrangeana fundamental para a dispersão atmosférica de uma única espécie de poluente é dada por:

$$C(x,t) = \int_0^t \int P(x,t/x',t')S(x',t')dx' dt' \quad (1.5.B)$$

onde:  $C(x,t)$  é a concentração média em  $x$  no tempo  $t$ ,  $S(x',t')$  é o termo fonte,  $P(x,t/x',t')$  é a função densidade de probabilidade das partículas, que representa a probabilidade de uma partícula de fluido que estava em  $x'$  no tempo  $t'$  alcançar  $x$  no tempo  $t$ . (GOMES, 2007)

### 1.5.4 Modelos Eulerianos

O modelo Euleriano é similar a um modelo Lagrangiano, que segue também o movimento de um grande número pacotes da pluma de poluição enquanto se movem de sua posição inicial. A diferença mais importante entre os dois modelos é que o modelo euleriano usa uma grade cartesiana tridimensional fixa como referência. Na modelagem euleriana, a dispersão é estudada em termos de uma equação diferencial parcial para a conservação da massa da substância considerada, sendo resolvida em uma malha (grade) fixa no tempo e no espaço. Elas fornecem valores médios de concentração, para os poluentes considerados, em um ponto no espaço. A partir das equações de conservação é possível obter um modelo matemático da dispersão de uma fonte, dadas as apropriadas condições iniciais e de contorno, e dos coeficientes de difusão. O transporte e a dispersão de contaminantes na baixa atmosfera, normalmente, são simulados em termos da equação difusão-advecção que é dada por:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} + V \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + S \quad (1.5.C)$$

onde:  $C$  é a concentração do poluente,  $K_x$ ,  $K_y$ ,  $K_z$  são os coeficientes de difusão turbulentos nas direções de  $x$ ,  $y$  e  $z$  (segundo a analogia de difusão molecular), respectivamente,  $U$  e  $V$  são as velocidades médias componentes do vento nas direções de  $x$  e  $z$  e  $S$  é termo fonte/sumidouro. (GOMES, 2007)

#### 1.5.5 Modelo de Gás Denso

Modelos de gás denso são modelos que simulam a dispersão de plumas de poluentes mais pensados que o ar. Esses modelos são usados principalmente para prever simular concentrações de dispersões de vazamentos súbitos. Os três comumente mais usados são (GOMES, 2007):

- DEGADIS – modelo desenvolvido pelo Dr. Jerry Havens e Dr. Tom Spicer, Universidade de Arkansas, Guarda Costeira dos Estados Unidos da América e USEPA.
- SLAB – modelo desenvolvido pela Lawrence Livermore National Laboratory, fundado pelo departamento de Energia dos Estados Unidos da América, Força Aérea dos Estados Unidos da América e USEPA
- HEGADAS – modelo desenvolvido pela SHELL OIL, divisão de pesquisa.

#### 1.5.6 Fluidodinâmica Computacional

A Fluidodinâmica Computacional (*Computational Fluid Dynamics* - CFD) pode ser definida como a simulação numérica de todos os processos físicos e/ou físico-químicos que apresentam escoamento. Essa predição de concentração, de velocidade, de pressão, de temperatura e das propriedades turbulentas é efetuada através de modelos diferenciais baseados nos princípios gerais da conservação de massa, de energia e da quantidade de movimento no domínio do espaço e do tempo. (ANSYS, 2009; PFLUCK, 2010)

A equação de conservação de massa na forma média temporal, em regime transiente, pode ser escrita como:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (1.5.D)$$

onde:  $\rho$  representa a massa específica do fluido,  $t$  a variável tempo e  $u_i$  e  $x_i$  remetem às variáveis de velocidade  $u$ ,  $v$ , e  $w$  e espaciais  $x$ ,  $y$  e  $z$ .

As equações de conservação da quantidade de movimento linear para escoamentos turbulentos, em regime transiente, desprezando a força de Coriolis e as forças de campo (força gravitacional) obtidas a partir da média temporal das equações de Navier-Stokes, resultam em:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_j u_i) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu \left[ \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \right] - \overline{(\rho_j)' u_i'} \right\} \quad (1.5.E)$$

A equação de conservação da energia pode ser escrita como:

$$\frac{\partial[\rho C_p T]}{\partial t} + \nabla \cdot [C_p \rho \vec{v} T - k_{eff} (\nabla T)] = G + \phi \quad (1.5.F)$$

Assumindo o regime transiente, a equação de transporte das espécies químicas para escoamento turbulento fica:

$$\frac{\partial(m_i)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i m_i) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \frac{\mu}{Sc} + \frac{\mu_t}{Sc_t} \right) \frac{\partial m_i}{\partial x_i} \right] + S \quad (1.5.G)$$

O ANSYS CFX é um dos *softwares* de fluidodinâmica computacional mais utilizado na atualidade, é capaz de simular fluxo de fluidos em uma variedade de aplicações e estudos. O CFX permite a engenheiros testarem sistemas em um ambiente virtual. O potencial de aplicação desse *software* inclui desde a simulação do fluxo de fluidos em cascos de navios, motores de turbina a gás (incluindo os compressores, câmara de combustão, turbinas e pós-combustão), aerodinâmica de aviões, bombas, ventiladores, hidrociclones, aspiradores de pó, entre outros.(ANSYS, 2009)

Existem inúmeros métodos de solução que são utilizados em códigos CFD. O mais comum, e aquele que o software ANSYS CFX baseia-se, é conhecida como a técnica de volume finito. Nesta técnica, a região de interesse é dividida em pequenas sub-regiões, chamados volumes de controle. As equações são discretizadas e resolvida iterativamente para cada volume de controle. Como resultado, uma aproximação do valor de cada variável em pontos específicos em todo o domínio pode ser obtida. Desta forma, obtém-se uma imagem completa do comportamento do fluxo.(ANSYS, 2009)

Segundo BORTOLI (2000), os modelos CFD são desenvolvidos basicamente em 5 etapas:

- Tratamento do problema e Criação da Geometria;
- Geração da malha
- Especificação do escoamento
- Solução numérica
- Análise dos resultados.

A etapa de tratamento do problema consiste no estudo compreensivo e escolha da melhor estratégia para resolução do problema, incluindo a determinação da geometria e domínio de solução.

A geração da malha consiste na subdivisão do domínio em várias partes, onde as equações governantes do fenômeno em questão serão discretizadas e resolvidas. A disposição e tamanho dos volumes de controle no domínio computacional influenciarão significativamente na qualidade e a rapidez na obtenção da solução do problema. (PFLUCK, 2010)

Quanto maior o número de subdivisões numa geometria, melhor esta é representada, porém, nem sempre esta é a melhor opção a ser escolhida. Malhas com muitos volumes de controle requerem uma demanda computacional muito maior, aumentando demasiadamente o tempo de processamento do problema.

Em problemas envolvendo a dispersão de poluentes, onde normalmente trabalha-se com domínios de solução bastante grandes, este pode ser o principal limitante na geração da malha, pois a malha gerada pode demandar um esforço computacional muito grande, impossibilitando a resolução do mesmo em computadores pessoais. Por outro lado, malhas grosseiras podem levar a resultados imprecisos ou a não convergência da solução. Para minimizar estes problemas deve-se compreender e considerar o fenômeno físico envolvido no problema, para que se possa refinar a malha nas regiões de gradientes elevados, a fim de permitir um processamento mais rápido e uma solução mais precisa. (PFLUCK, 2010)

Na especificação do escoamento serão determinados os modelos matemáticos utilizados para a resolução dos problemas propostos, escolha das condições de contorno, precisão da resposta, número máximo de iterações, esquemas de interpolação, entre outros.

A solução numérica consiste na solução iterativa do problema de acordo com

o algoritmo utilizado pelo programa. Nessa etapa as equações diferenciais parciais são integradas ao longo de todos os volumes de controle da região de interesse, isto é, a aplicação de uma lei da conservação de base (por exemplo, para a massa) para cada volume de controle. Estas equações integrais são convertidas para um sistema de equações algébricas através da geração de um conjunto de aproximações para os termos das equações integrais. As equações algébricas são resolvidas iterativamente. Para cada iteração, um erro, ou residual, é relatado como uma medida de conservação global das propriedades de fluxo. Ao final obtém-se a convergência. (ANSYS, 2009)

E a análise dos resultados é realizada através da visualização e interpretação da solução. Nessa fase é possível obter-se visualizações dos volumes geométricos e de controle; vetores indicando a direção e magnitude dos fluxos; visualização de variáveis como temperatura, pressão e velocidade no domínio; quantitativos cálculos numéricos; Imagens 2D e 3D; Animação e Gráficos. Na Figura 4 observamos os resultados de uma simulação em CFD para emissões de poluentes na atmosfera na forma de imagem 3D.

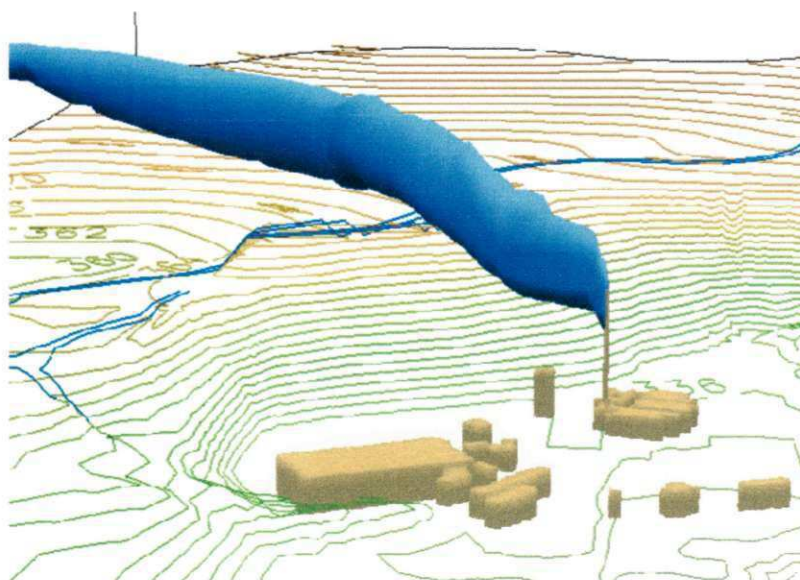


Figura 3 - Ilustração de resultados de um modelo baseado em Fluidodinâmica Computacional (ARIA Technologies, 2012)

## 1.6 Sustentabilidade na indústria de Alumina e Alumínio

A indústria brasileira de alumina e alumínio vem crescendo com a utilização sustentável do grande potencial mineral do Brasil. Enquanto produzem um dos metais mais



utilizados na vida moderna, as empresas do setor atuam de forma responsável nos aspectos econômico, social e ambiental, minimizando impactos negativos e multiplicando os benefícios gerados pela atividade. (ABAL, 2012)

Algumas dessas empresas estruturaram o seu modelo de negócios apoiadas no conceito de sustentabilidade, incorporando em sua rotina critérios que asseguram o sucesso econômico, a preservação ambiental e responsabilidade social. Como exemplo podemos citar a estratégia global da Alcoa, desenvolvida em 2000, por uma equipe mundial de especialistas que analisaram as tendências ambientais e sociais desde 1990 e projetaram 20 e 30 anos no futuro, elaborando um Plano Estratégico para a Sustentabilidade 2020 e 2030. (ALCOA, 2012)

### **1.7 Refinaria de Bauxita**

Em 1888, Karl Josef Bayer desenvolveu o processo de extração de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) conhecido como “Processo Bayer”. O processo Bayer representa um marco na história da metalurgia, sendo considerado, ao lado do processo de cianetação para tratamento de ouro e prata, o marco do nascimento da hidrometalurgia moderna.

O processo Bayer possui um estágio inicial, denominado digestão, que envolva moagem da bauxita e em seguida a digestão propriamente dita com uma solução cáustica de hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) sob temperatura e pressão. Nestas condições a maioria das espécies contendo alumínio é dissolvida, formando um licor verde. A segunda etapa é denominada de clarificação, na qual ocorre a separação, através de espessamento e filtração, entre as fases sólida (resíduo insolúvel) e líquida (licor verde). O espessamento é um processo de decantação, em que o resíduo proveniente da digestão é encaminhado para unidades denominadas de espessadores/lavadores. O objetivo destas unidades é adensar o resíduo, aumentando seu teor de sólidos, para recuperar a maior quantidade de  $\text{NaOH}$  possível e fornecer um “overflow” para a filtragem. Em seguida, ocorre a etapa de precipitação, quando se dá o esfriamento do licor verde. Após este esfriamento é feita adição de uma pequena quantidade de cristais de alumina (semeadura) para estimular a precipitação, em uma operação reversa à digestão. Posteriormente a alumina cristalizada (trihidratada- $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) é encaminhada para a calcinação e o licor residual contendo  $\text{NaOH}$  e alguma alumina é recirculada para a etapa de digestão. A calcinação é a etapa final do processo, em que a alumina é calcinada a aproximadamente  $1000^\circ\text{C}$  para

desidratar os cristais, formando cristais de alumina puros ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ). (SILVA FILHO, 2007)

A Figura 4 apresenta um fluxograma com as principais fases do refino da bauxita para extração de alumina.

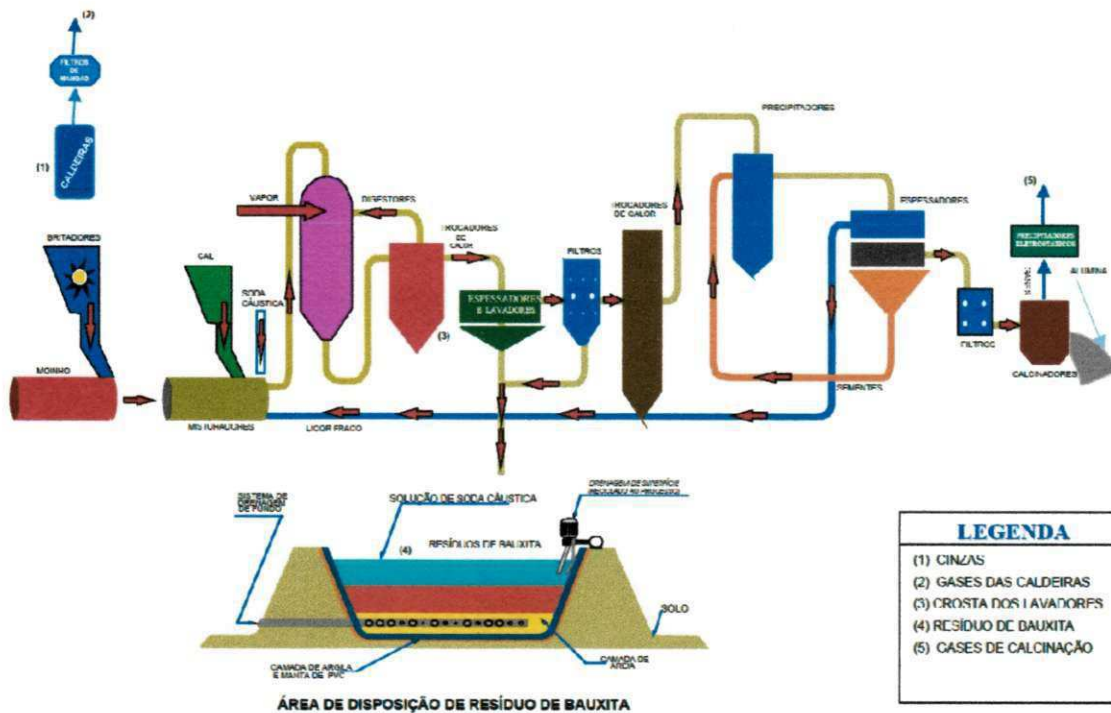


Figura 4 - Fluxograma de Processo da Refinaria para a Produção de Alumina. (CATUNDA, 2004)

## 1.8 Caldeiras Babcock & Wilcox (CBW)

As caldeiras de geração de vapor e eletricidade representam significativa parcela das emissões de  $\text{SO}_2$  no ambiente industrial. A Refinaria de Bauxita objeto desse estudo possui três caldeiras Babcock & Wilcox de queima em grelha com capacidade de geração total de 210 t/h de vapor a 18  $\text{kgf/cm}^2$  alimentadas por carvão mineral.

O consumo de carvão em cada caldeira é de aproximadamente 7 toneladas por hora. Dados de operação das caldeiras extraídos das fichas técnicas do equipamento, fornecidos pelos fabricantes, e das informações disponibilizadas pelos engenheiros da Refinaria de Bauxita, apresentam as seguintes informações (FIGENER, 2008):

- Consumo de carvão (t/h) = 6,8
- Fluxo de gases (t/h) = 83,4
- Fluxo de ar de combustão (t/h) = 76,2
- Produção de vapor (t/h) = 70,0
- Excesso de ar (%) = 29

- Temperatura de saída Gases (°C) = 188
- Temperatura de entrada Ar a jusante do pré-aquecedor de ar (°C) = 177
- Temperatura de saída Vapor (°C) = 243,3
- Pressão do vapor vivo (bar abs.) = 17,2

## 1.9 Principais Combustíveis Utilizados em Caldeiras

### 1.9.1 Carvão Mineral

O carvão mineral é uma rocha sedimentar, de cor preta ou marrom, combustível, formada a partir da decomposição de vegetais que sofreram soterramento e se compactaram em camadas. O carbono é o principal elemento presente no carvão mineral, seu teor determina a maturidade geológica deste mineral, ou seja, o estágio de carbonificação atingido na sequência evolutiva. O desenvolvimento deste combustível é indicado por quatro etapas distintas, nas quais, a turfa é a composição inicial, medida pelo reduzido teor de carbono, o linhito, a hulha e o antracito, conforme propriedades apresentadas na tabela abaixo. (RODRIGUES, 2009)

A Tabela 3 apresenta as principais propriedades, como cor, brilho, poder calorífico e teor carbono, para os carvões minerais.

**Tabela 3 - Propriedades dos Carvões Minerais**

Mineral	Cor	Brilho	Poder Calorífico (Kcal / kg)	Carbono (%)
Turfa	parda	não tem	1500 a 2000	55 a 65
Linhito	negro-parda	mate	2000 a 7000	65 a 80
Hulha	negra	céreo	7000 a 8500	80 a 93
Antracito	negra	intenso	8500 a 9000	93 a 98

Fonte: Rochas e Minerais, Walter Schumann, 1985(RODRIGUES, 2009)

### 1.9.2 Gás natural

O gás natural é uma mistura de hidrocarbonetos gasosos, originados da decomposição de matéria orgânica fossilizada ao longo de milhões de anos. Esse combustível à temperatura ambiente e pressão atmosférica, permanece no estado gasoso contendo desde metano (CH<sub>4</sub>) até o hexano (C<sub>6</sub>H<sub>14</sub>), podendo ser encontrado na forma livre ou associado à fase óleo. (SALOMON, 2003 & RODRIGUES, 2009)

A Tabela 4 apresenta as principais especificações do gás natural para o Brasil de acordo com os regulamentos da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural



eBiocombustíveis, onde o limite especificado são valores referidos a 293,15K (20°C) e 101,325kPa (1atm) em base seca, exceto os pontos de orvalho, de hidrocarbonetos e de água. O índice de Wobbe é calculado empregando o poder calorífico superior em relação à densidade relativa. (ANP, 2008)

**Tabela 4 - Propriedades do Gás Natural**

Característica	Unidade	Limite (Região Norte)	Limite (Nordeste)	Limite (Centro-oeste, Sudeste e Sul)
Poder calorífico superior	kJ/m <sup>3</sup>	34000 a 38400	35000 a 43000	35000 a 43000
Índice de Wobbe	kJ/m <sup>3</sup>	40500 a 45000	46500 a 53500	46500 a 53500
Metano, mín	% mol.	68	85	85
Etano, máx	% mol.	12	12	12
Propano, máx	% mol.	3	6	6
Butanos e mais pesados, máx	% mol.	1,5	3	3
Inertes (N <sub>2</sub> +CO <sub>2</sub> ), máx	% mol.	18	8	6
Enxofre Total, máx	mg/m <sup>3</sup>	70	70	70
Ponto de orvalho de água a 1atm, máx	°C	-39	-39	-45

Fonte:ANP, 2008

### 1.9.3 Óleos combustíveis

Os óleos combustíveis são óleos residuais de alta viscosidade, obtidos do refino do petróleo ou através da mistura de destilados pesados com óleos residuais de refinaria. São utilizados como combustível pela indústria, de modo geral em equipamentos destinados a geração de calor, como fornos, caldeiras e secadores, ou indiretamente em equipamentos destinados a produzir trabalho a partir de uma fonte térmica. (ANP, 1999)

A Tabela 5 apresenta a classificação do óleo combustível de acordo com a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis do Brasil.

**Tabela 5 - Classificação do Óleo Combustível**

Característica	Unidade	Óleo Combustível (tipo)			
		B1	A1	B2	A2
Viscosidade Cinemática a 60°C, máx.	mm <sup>2</sup> /s	620	620	960	960
Viscosidade SayboltFurol a 50°C, máx.	(cSt)SSF	600	600	900	900
Enxofre, máx.	% massa	1,0	2,5	1,0	2,5
Água e Sedimentos, máx.	% volume	2	2	2	2
Ponto de Fulgor	°C	66	66	66	66
Vanádio, máx.	mg/kg	200	200	200	200

Fonte:ANP, 1999

#### 1.9.4 Biomassa

A biomassa é definida como qualquer matéria orgânica que possa ser transformada em energia mecânica, térmica ou elétrica. De acordo com a sua origem, pode ser: florestal (madeira, principalmente), agrícola (soja, arroz e cana-de-açúcar, entre outras) e rejeitos urbanos e industriais (sólidos ou líquidos, como o lixo). Os derivados obtidos dependem tanto da matéria-prima utilizada quanto da tecnologia de processamento para obtenção dos energéticos. (ANEEL, 2008)

No Maranhão, um estudo realizado pela Consultoria Tecbio identificou a disponibilidade de biomassa de eucalipto, babaçu e casca de arroz; ainda sugerindo um grande potencial para a produção de bagaço de cana e torta de mamona no Estado. (PARENTE, 2007)

A Tabela 6, elaborada durante um estudo da utilização da biomassa em substituição parcial ao carvão mineral na fabricação do coque, apresenta a caracterização de algumas biomassas disponíveis no Brasil.

**Tabela 6 - Caracterização de qualidade de Biomassas**

Biomassa	Teor (%)			
	Matéria volátil	Cinzas	Enxofre	Carbono fixo
Casca de soja	63,5	8,9	0,34	27,7
Casca de coco (calcinação)	50,9	7,2	0,07	41,9
Casca de arroz	13,0	44,9	0,01	42,1
Carvão vegetal	27,5	3,3	N.D.	69,2

Fonte: Silva et al (2008)

A Tabela 7 apresenta uma comparação de caracterizações realizada por Figener (2008) entre Biomassas e o Carvão Mineral utilizado nas Caldeiras BW da Refinaria de Bauxita.

**Tabela 7 - Composição de Biomassas e Carvão Mineral**

Material	Poder Calorífico Inferior	Umidade	Enxofre	Cinzas
	(MJ/kg)	(%)	(%)	(%)
Carvão Mineral	27,9	10	2,67	11,11
Biomassa de Eucalipto	18,0	45	0,02	0,67
Biomassa de Babaçu	19,0	14	0,03	2,00

esse poluente. Nesse cenário, assim como também no Cenário 5, a pluma de SO<sub>2</sub> emitida pelas chaminés em concentrações acima do Padrão Primário alcança sua dispersão total antes de chegar ao nível do solo.

De acordo com as simulações realizadas, a completa dispersão atmosférica da pluma de SO<sub>2</sub> em atmosfera neutra proveniente das três caldeiras Babcock & Wilcox alcançará a performance ideal a nível do solo a partir da substituição parcial ou total do combustível capazes de reduzir 25% do enxofre nas emissões.

Dessa forma, a utilização de Biomassa de eucalipto ou babaçu, materiais abundantes na região, além da utilização de carvões minerais com menor concentração de enxofre, se apresenta como alternativa que deveter sua viabilidade técnica e econômica estudada.

## 5 CONCLUSÃO

Nesta dissertação foram avaliadas as diferenças na dispersão de SO<sub>2</sub> a partir de alterações no teor de dióxido de enxofre emitido por três caldeiras Babcock & Wilcox de uma Refinaria Bauxita que proporcionassem a redução de impactos ambientais.

Os resultados das simulações indicaram que em condições de atmosfera neutra a completa dispersão atmosférica da pluma de SO<sub>2</sub> proveniente das caldeiras alcançará a performance ideal a nível do solo a partir da substituição parcial ou total do combustível capazes de reduzir 25% do enxofre nas emissões.

Dessa forma, a utilização de Biomassa de eucalipto ou babaçu, materiais abundantes na região, além da utilização de carvões minerais com menor concentração de enxofre, se apresenta como alternativa que deve ter sua viabilidade técnica e econômica estudada.

O uso do modelo proposto para novas simulações durante os estudos de viabilidade técnica e econômica de alternativas de combustíveis para as três caldeiras Babcock & Wilcox da Refinaria de Bauxita será um instrumento de grande importância para os engenheiros de meio ambiente do Complexo Industrial.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomendamos a inclusão de todas as fontes de emissão atmosféricas do complexo industrial e simulações considerando a umidade do ar e reações atmosféricas das diversas espécies, de forma a aprofundar o conhecimento de todos os fenômenos envolvidos.

## REFERÊNCIAS

ALCOA. **Metas Estratégicas de Sustentabilidade.** Disponível em: [http://www.alcoa.com/brazil/pt/custom\\_page/reciclagem/meta\\_2020.asp](http://www.alcoa.com/brazil/pt/custom_page/reciclagem/meta_2020.asp). Acesso em: 2012.

ANSYS, Inc. **ANSYS CFX Introduction.** Canonsburg: ANSYS, 2009.

ANSYS, Inc. **ANSYS CFX-Solver Theory Guide.** Canonsburg: ANSYS, 2009.

ARIA Technologies. **ARIA Local Software.** Disponível em: [http://www.aria.fr/english/aria\\_local.php](http://www.aria.fr/english/aria_local.php). Acesso em: 2012.

BORTOLI, Álvaro Luiz. **Introdução à Dinâmica dos Fluidos Computacional.** Porto Alegre-RS: Ed. Universidade/UFRGS, 2000.

BRASIL. ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica (Brasil). **Atlas de energia elétrica do Brasil.** Brasília-DF: Aneel, 2008.

BRASIL. ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução N° 16 de 17/06/2008.** Brasília-DF: Diário Oficial da União, 18/06/2008.

BRASIL. ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Resolução N° 65 de 09/12/2011.** Brasília-DF: Diário Oficial da União, 12/12/2011.

BRASIL. ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Portaria N° 80 de 30/04/1999.** Brasília-DF: Diário Oficial da União, 03/05/1999.

CATUNDA, Cristina. et al. **Estudo de Impacto Ambiental da Ampliação da Refinaria de Bauxita da Alumar.** Relatório WO B1389/04.01. São Paulo-SP: ERM BRASIL LTDA, 2004.

COLLE, Sergio&PEREIRA, Enio Bueno. **Atlas de Irradiação Solar do Brasil.** Brasília: INMET, 1998.

CONAMA. **Resolução N° 003/1990.** Dispõe sobre padrões de qualidade do ar, previstos no PRONAR. Brasília-DF: Diário Oficial da União, 22/08/1990.

CORÁ, Rogério. **Aspectos Técnicos e Ambientais do Uso do Carvão Mineral em**

**Caldeiras.** Dissertação de Mestrado. Itajubá-MG: UNIFEI, 2006.

DANIELSON, Eric; LEVIN, James & ABRAMS, Elliot. **Meteorology.** Boston: McGraw-Hill, 2003.

Estado de São Paulo. **Decreto nº 8.468, de 8 de setembro de 1976.** Aprova o Regulamento da Lei nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente. Disponível em: <http://www.cetesb.sp.gov.br/Institucional/documentos/Dec8468.pdf>. Acesso em: 2012.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. EPA (US Environmental Protection Agency). **Air Pollutants and Control Techniques - Sulfur Oxides.** Disponível em: <http://www.epa.gov/apti/bccs/module6/sulfur/sulfur.htm>. Acesso em: 2011.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. EPA (US Environmental Protection Agency). **Alternative Fuel Conversion.** Disponível em: <http://www.epa.gov/otag/consumer/fuels/altfuels/altfuels.htm>. Acesso em: 2011.

ESTADOS UNIDOS DA AMÉRICA. EPA (US Environmental Protection Agency). **National Ambient Air Quality Standards (NAAQS).** Disponível em: <http://www.epa.gov/air/criteria.html>. Acesso em: 2012.

FIGENER. **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica de Substituição de Carvão por Biomassa nas Caldeiras da Unidade Alumina.** Relatório RE-071342/04. São Paulo-SP: FIGENER, 2008.

GOMES, Valério. **Modelagem e Simulação da Dispersão das Emissões de Fluoreto Gasoso de uma Redução Eletrolítica de Alumínio.** Dissertação de Mestrado. Campina Grande-PB: UFCG, 2007.

GOOGLE. **Imagens de Satélite.** Software Google Earth versão 6.2.2012.

HINDRICH, Roger & KLEINBACH, Merlin. **Energia e Meio Ambiente.** Cengage Learning Editores, 2004.

IEA Clean Coal Centre. **Clean Coal Technologies.** Disponível em: <http://www.iea-coal.org.uk/site/2010/database-section/clean-coal-technologies>. Acesso em: 2012.

- MALAVOLTA, E. **ABC da Adubação**. São Paulo SP, Editora Agronomia Ceres, 1979.
- MARQUES FILHO, E. P. **Alguns aspectos teóricos e experimentais da camada limite superficial acima do Pantanal Matogrossense**. Dissertação de Mestrado. São José dos Campos: INPE, 1999.
- MARTINS, Cláudia Rocha & ANDRADE, Jailson Bittencourt de. **Química Atmosférica do Enxofre: Emissões, Reações em Fase Aquosa e Impacto Ambiental**. São Paulo-SP: Quim. Nova, 2002.
- MOREIRA, Davidson&TIRABASSI, Tiziano. **Modelo Matemático de Dispersão de Poluentes na Atmosfera: Um Instrumento Técnico para a Gestão Ambiental**. Campinas: Revista Ambiente & Sociedade, v. 7, n. 2, Dez. 2004.
- PARENTE, Expedito José de Sá. et al. **Estudos Técnicos sobre Bicombustíveis com vistas à Utilização na Alumar**. Fortaleza-CE: TECBIO, 2007.
- PASQUILL, F. **The Estimation of the Dispersion of Windborne Material**. Meteorological Magazine, 1961.
- PFLUCK, Carlos Eduardo de Freitas. **Simulação Fluidodinâmica da Dispersão de Poluentes na Atmosfera**. Dissertação de Mestrado. Porto Alegre-RS: UFRGS, 2010.
- ROBALLO, Suelen Trindade & FISCH, Gilberto. **Estudo das Características do Perfil Vertical do Vento no Centro de Lançamento de Alcântara (CLA)**. São José dos Campos: INPE, 2006.
- RODRIGUES, Antonio Fernando da Silva. **Economia Mineral do Brasil**. Brasília-DF: DNPM, 2009.
- SALOMON, Karina Ribeiro. **Avaliação Quantitativa do Impacto Ambiental das Emissões Gasosas e do Uso da Água de Resfriamento em Instalações de Geração Termelétrica**. Itajubá-MG: UNIFEI, 2003.
- SILVA FILHO, E. B.; ALVES, M. C. M.; DA MOTTA, M. **Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas**. Revista Matéria, v. 12, n. 2, pp. 322 – 338, 2007.

SILVA. Agenor Medrado da.et al. **Estudo da Utilização da Biomassa em Substituição Parcial ao Carvão Mineral na Fabricação do Coque na Coqueira da CSN.** Tecnologia em Metalurgia e Materiais, São Paulo, v.5, n.1, p. 40-45, jul.-set. 2008.

SPONK.**Schematic desing of the absorber of a flue gas desulfurization unit.** WikimediaCommons.Disponívelem:[http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flue\\_gas\\_desulfurization\\_unit\\_EN.svg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Flue_gas_desulfurization_unit_EN.svg). Acessoem: 2012.

WHO - World Health Organization.**Air quality and health.**Fact sheet n°313.Updated September, 2011.Disponível em: <http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/en/index.html>. Acesso em: 2011.



## APÊNDICE – Resultados da Simulação do Cenário 3

This run of the CFX-13.0 Solver started at 08:31:44 on 16 Jun 2012 by user (intel\_xeon64.sse2\_winnt) using the command:

```
"C:\Program Files\ANSYS Inc\v130\CFX\bin\perl\lib\cfx5solve.pl" -batch
-cclrunInput.ccl -fullname "Fluid Flow_028"
```

Setting up CFX Solver run ...

```
-----
CFX Command Language for Run
-----
```

LIBRARY:

CEL:

EXPRESSIONS:

```
PerfilV = V*(z/10[m])^0.25
TetoP = areaAve(p)@F23.22
TetoT = areaAve(T)@F23.22
V = 2.2 [m s^-1]
perfilt = 26.4 [C] - 0.0065*z*1 [C m^-1]
roAir = ave(Density)@Ambiente
saidaS = areaAve(SO2.mf)@F25.22
saidaT = areaAve(T)@F25.22
tetoS = areaAve(SO2.mf)@F23.22
END
```

END

MATERIAL: Air

```
Material Description = Air Ideal Gas (constant Cp)
Material Group = Air Data, Calorically Perfect Ideal Gases
Option = Pure Substance
Thermodynamic State = Gas
```

PROPERTIES:

Option = General Material

EQUATION OF STATE:

Molar Mass = 28.96 [kg kmol^-1]

Option = Ideal Gas

END

SPECIFIC HEAT CAPACITY:

Option = Value

Specific Heat Capacity = 1.0044E+03 [J kg^-1 K^-1]

Specific Heat Type = Constant Pressure

END

REFERENCE STATE:

Option = Specified Point

Reference Pressure = 1 [atm]

Reference Specific Enthalpy = 0. [J/kg]

Reference Specific Entropy = 0. [J/kg/K]

Reference Temperature = 25 [C]

END

DYNAMIC VISCOSITY:

Dynamic Viscosity = 1.831E-05 [kg m^-1 s^-1]

Option = Value

END

THERMAL CONDUCTIVITY:

Option = Value

Thermal Conductivity = 2.61E-2 [W m^-1 K^-1]

END

ABSORPTION COEFFICIENT:

Absorption Coefficient = 0.01 [m^-1]

Option = Value

END

SCATTERING COEFFICIENT:

Option = Value

Scattering Coefficient = 0.0 [m^-1]

END

REFRACTIVE INDEX:

Option = Value

Refractive Index = 1.0 [m m^-1]

END

END

MATERIAL: SO2

```
Material Description = Sulphur Dioxide SO2 Ideal Gas (0 C and 1 atm)
```

```
Material Group = Calorically Perfect Ideal Gases
```

```
Option = Pure Substance
```

```
Thermodynamic State = Gas
```

PROPERTIES:

Option = General Material

EQUATION OF STATE:

```

Molar Mass = 64.06 [kg kmol-1]
Option = Ideal Gas
END
SPECIFIC HEAT CAPACITY:
Option = Value
Specific Heat Capacity = 625 [J kg-1 K-1]
Specific Heat Type = Constant Pressure
END
REFERENCE STATE:
Option = Specified Point
Reference Pressure = 1 [atm]
Reference Temperature = 0 [C]
END
DYNAMIC VISCOSITY:
Dynamic Viscosity = 16.5E-06 [kg m-1 s-1]
Option = Value
END
THERMAL CONDUCTIVITY:
Option = Value
Thermal Conductivity = 77E-04 [W m-1 K-1]
END
ABSORPTION COEFFICIENT:
Absorption Coefficient = 1.0 [m-1]
Option = Value
END
SCATTERING COEFFICIENT:
Option = Value
Scattering Coefficient = 0.0 [m-1]
END
REFRACTIVE INDEX:
Option = Value
Refractive Index = 1.0 [m m-1]
END
END
MATERIAL: mistura
Material Group = Calorically Perfect Ideal Gases
Materials List = Air,SO2
Option = Variable Composition Mixture
Thermodynamic State = Gas
MIXTURE PROPERTIES:
Option = Ideal Mixture
EQUATION OF STATE:
Option = Ideal Mixture
END
END
END
FLOW: Flow Analysis 1
SOLUTION UNITS:
Angle Units = [rad]
Length Units = [m]
Mass Units = [kg]
Solid Angle Units = [sr]
Temperature Units = [K]
Time Units = [s]
END
ANALYSIS TYPE:
Option = Steady State
EXTERNAL SOLVER COUPLING:
Option = None
END
END
DOMAIN: Ambiente
Coord Frame = Coord 0
Domain Type = Fluid
Location = B22
BOUNDARY: Ambiente Default
Boundary Type = WALL
Location = F29.22,F31.22,F33.22
BOUNDARY CONDITIONS:
HEAT TRANSFER:
Option = Adiabatic
END
MASS AND MOMENTUM:
Option = No Slip Wall
END
WALL ROUGHNESS:
Option = Smooth Wall
END
END
END
BOUNDARY: Camada
Boundary Type = WALL
Location = F23.22
BOUNDARY CONDITIONS:
HEAT TRANSFER:

```

```

    Fixed Temperature = perfilt
    Option = Fixed Temperature
  END
  MASS AND MOMENTUM:
    Option = Free Slip Wall
  END
END
BOUNDARY: Chamine1
Boundary Type = INLET
Location = F30.22
BOUNDARY CONDITIONS:
  COMPONENT: SO2
    Mass Fraction = 0.000525
    Option = Mass Fraction
  END
  FLOW DIRECTION:
    Option = Normal to Boundary Condition
  END
  FLOW REGIME:
    Option = Subsonic
  END
  HEAT TRANSFER:
    Option = Static Temperature
    Static Temperature = 157 [C]
  END
  MASS AND MOMENTUM:
    Mass Flow Rate = 28.05 [kg s-1]
    Option = Mass Flow Rate
  END
  TURBULENCE:
    Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
  END
END
BOUNDARY: Chamine2
Boundary Type = INLET
Location = F32.22
BOUNDARY CONDITIONS:
  COMPONENT: SO2
    Mass Fraction = 0.000525
    Option = Mass Fraction
  END
  FLOW DIRECTION:
    Option = Normal to Boundary Condition
  END
  FLOW REGIME:
    Option = Subsonic
  END
  HEAT TRANSFER:
    Option = Static Temperature
    Static Temperature = 157 [C]
  END
  MASS AND MOMENTUM:
    Mass Flow Rate = 28.05 [kg s-1]
    Option = Mass Flow Rate
  END
  TURBULENCE:
    Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
  END
END
BOUNDARY: Chamine3
Boundary Type = INLET
Location = F34.22
BOUNDARY CONDITIONS:
  COMPONENT: SO2
    Mass Fraction = 0.000525
    Option = Mass Fraction
  END
  FLOW DIRECTION:
    Option = Normal to Boundary Condition
  END
  FLOW REGIME:
    Option = Subsonic
  END
  HEAT TRANSFER:
    Option = Static Temperature
    Static Temperature = 157 [C]
  END
  MASS AND MOMENTUM:
    Mass Flow Rate = 28.05 [kg s-1]
    Option = Mass Flow Rate
  END
  TURBULENCE:
    Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
  END
END

```

```

END
END
BOUNDARY: Jusante
Boundary Type = OUTLET
Location = F25.22
BOUNDARY CONDITIONS:
FLOW REGIME:
Option = Subsonic
END
MASS AND MOMENTUM:
Normal Speed = Perfilv
Option = Normal Speed
END
END
END
BOUNDARY: LadoD
Boundary Type = WALL
Location = F26.22
BOUNDARY CONDITIONS:
HEAT TRANSFER:
Fixed Temperature = perfilt
Option = Fixed Temperature
END
MASS AND MOMENTUM:
Option = Free Slip wall
END
END
END
BOUNDARY: LadoE
Boundary Type = WALL
Location = F28.22
BOUNDARY CONDITIONS:
HEAT TRANSFER:
Fixed Temperature = perfilt
Option = Fixed Temperature
END
MASS AND MOMENTUM:
Option = Free Slip wall
END
END
END
BOUNDARY: Montante
Boundary Type = INLET
Location = F27.22
BOUNDARY CONDITIONS:
COMPONENT: SO2
Mass Fraction = 0
Option = Mass Fraction
END
FLOW REGIME:
Option = Subsonic
END
HEAT TRANSFER:
Option = Static Temperature
Static Temperature = perfilt
END
MASS AND MOMENTUM:
Normal Speed = Perfilv
Option = Normal Speed
END
TURBULENCE:
Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
END
END
END
BOUNDARY: Solo
Boundary Type = WALL
Location = F24.22
BOUNDARY CONDITIONS:
HEAT TRANSFER:
Fixed Temperature = perfilt
Option = Fixed Temperature
END
MASS AND MOMENTUM:
Option = No Slip wall
END
WALL ROUGHNESS:
Option = Rough wall
Sand Grain Roughness Height = 4 [m]
END
END
END
DOMAIN MODELS:
BUOYANCY MODEL:
Buoyancy Reference Density = rhoAir
Gravity X Component = 0 [m s^-2]
Gravity Y Component = 0 [m s^-2]

```

```

Gravity Z Component = -g
Option = Buoyant
BUOYANCY REFERENCE LOCATION:
Option = Automatic
END
DOMAIN MOTION:
Option = Stationary
END
MESH DEFORMATION:
Option = None
END
REFERENCE PRESSURE:
Reference Pressure = 1 [atm]
END
FLUID DEFINITION: Fluid 1
Material = mistura
Option = Material Library
MORPHOLOGY:
Option = Continuous Fluid
END
FLUID MODELS:
COMBUSTION MODEL:
Option = None
END
COMPONENT: Air
Option = Constraint
END
COMPONENT: SO2
Option = Transport Equation
END
HEAT TRANSFER MODEL:
Option = Thermal Energy
END
THERMAL RADIATION MODEL:
Option = None
END
TURBULENCE MODEL:
Option = k epsilon
BUOYANCY TURBULENCE:
Option = None
END
TURBULENT WALL FUNCTIONS:
Option = Scalable
END
INITIALISATION:
Option = Automatic
INITIAL CONDITIONS:
Velocity Type = Cartesian
CARTESIAN VELOCITY COMPONENTS:
Option = Automatic with Value
U = 0 [m s-1]
V = 2.22 [m s-1]
W = 0 [m s-1]
END
COMPONENT: SO2
Mass Fraction = 0.0
Option = Automatic with value
END
STATIC PRESSURE:
Option = Automatic with value
Relative Pressure = 1 [atm]
END
TEMPERATURE:
Option = Automatic with value
Temperature = perfilt
END
TURBULENCE INITIAL CONDITIONS:
Option = Medium Intensity and Eddy Viscosity Ratio
END
OUTPUT CONTROL:
RESULTS:
File Compression Level = Default
Option = Standard
END
SOLVER CONTROL:
Turbulence Numerics = First Order
ADVECTION SCHEME:
Option = High Resolution

```



```

Version 2010.10.03-23.02          Mon Oct  4 06:29:36 GMTDT 2010
                                Executable Attributes
double-int32-64bit-novc8-noifort-novc6-optimised-supfort-noprof-nos
Copyright 2010 ANSYS Inc.

```

```

-----
Job Information
-----

```

```

Run mode:      partitioning run
Host computer: (PID:2900)
Job started:   Sat Jun 16 08:31:46 2012

```

```

-----
Memory Allocated for Run (Actual usage may be less)
-----

```

Data Type	Kwords	words/Node	words/Elem	Kbytes	Bytes/Node
Real	1824.7	9.67	1.67	14255.2	77.34
Integer	19263.6	102.06	17.59	75248.6	408.24
Character	3254.9	17.24	2.97	3178.6	17.24
Logical	80.0	0.42	0.07	312.5	1.70
Double	0.5	0.00	0.00	3.9	0.02

```

-----
***** Notice *****
-----

```

```

No reference value for the specific enthalpy was specified for
material "SO2". In this case, the solver will use a value
of zero. Please note that this is different from previous releases,
where the reference value was set to H_ref = T_ref*cp.

```

```

-----
Mesh Statistics
-----

```

```

Domain Name :Ambiente

Total Number of Nodes          =      188748
Total Number of Elements       =     1095105
Total Number of Tetrahedrons   =     1095105

Total Number of Faces          =      23226

```

```

-----
Vertex Based Partitioning
-----

```

```

Partitioning of domain: Ambiente

- Partitioning tool:      MeTis multilevel k-way algorithm
- Number of partitions:   3
- Number of graph-nodes:  188748
- Number of graph-edges:  2590930

```

```

-----
Partitioning Information
-----

```

```

Partitioning information for domain: Ambiente

```

Part	Elements		Vertices			Faces	
	Number	%	Number	%	%Ovlp	Number	%
Full	1095105		188748			23226	
1	367943	32.8	65709	33.1	3.8	11054	47.2
2	379693	33.8	66453	33.5	6.0	3935	16.8
3	374567	33.4	66281	33.4	4.9	8442	36.0
Sum	1122203	100.0	198443	100.0	4.9	23431	100.0

```

+-----+
| Partitioning CPU-Time Requirements |
+-----+

```

```

- Preparations 1.014E+00 seconds
- Low-level mesh partitioning 1.560E-01 seconds
- Global partitioning information 1.560E-02 seconds
- Element and face partitioning information 4.680E-02 seconds
- Vertex partitioning information 0.000E+00 seconds
- Partitioning information compression 0.000E+00 seconds
- Summed CPU-time for mesh partitioning 1.264E+00 seconds

```

```

+-----+
| Job Information |
+-----+

```

```

Host computer: (PID:2900)
Job finished: Sat Jun 16 08:31:48 2012
Total CPU time: 1.732E+00 seconds
or: ( 0: 0: 0: 1.732 )
      ( Days: Hours: Minutes: Seconds )

Total wall clock time: 2.000E+00 seconds
or: ( 0: 0: 0: 2.000 )
      ( Days: Hours: Minutes: Seconds )

```

```

+-----+
| Solver |
+-----+

```

```

+-----+
| ANSYS CFX Solver 13.0 |
+-----+

```

```

Version 2010.10.03-23.02 Mon Oct 4 06:29:36 GMTDT 2010
Executable Attributes
double-int32-64bit-novc8-noifort-novc6-optimised-supfort-noprof-nos
Copyright 2010 ANSYS Inc.
+-----+

```

```

+-----+
| Job Information |
+-----+

```

```

Run mode: parallel run (MPI)

Host computer: (PID:1436)
Par. Process: Master running on mesh partition: 1
Solver Build: Mon Oct 4 06:29:36 GMTDT 2010
Attributes: double-int32-64bit-novc8-noifort-novc6-optimised-su...
Job started: Sat Jun 16 08:31:48 2012

Host computer: (PID:1452)
Par. Process: Slave running on mesh partition: 2
Solver Build: Mon Oct 4 06:29:36 GMTDT 2010
Attributes: double-int32-64bit-novc8-noifort-novc6-optimised-su...
Job started: Sat Jun 16 08:31:48 2012

Host computer: (PID:3768)
Par. Process: Slave running on mesh partition: 3
Solver Build: Mon Oct 4 06:29:36 GMTDT 2010
Attributes: double-int32-64bit-novc8-noifort-novc6-optimised-su...
Job started: Sat Jun 16 08:31:48 2012

```

```

+-----+
| Memory Allocated for Run (Actual usage may be less) |
+-----+

```

```

Allocated storage in: Kwords
                    words/Node
                    words/Elem

```



Kbytes Bytes/Node					
Partition	Real	Integer	Character	Logical	Double
1	31245.9	11829.3	3704.9	80.0	8.0
	475.52	180.03	56.38	1.22	0.12
	84.92	32.15	10.07	0.22	0.02
	244108.4	46208.1	3618.1	78.1	62.5
	3804.15	720.10	56.38	1.22	0.97
2	31038.0	11886.9	3704.9	80.0	8.0
	467.07	178.88	55.75	1.20	0.12
	81.75	31.31	9.76	0.21	0.02
	242484.5	46433.3	3618.1	78.1	62.5
	3736.54	715.51	55.75	1.20	0.96
3	31298.9	11896.6	3704.9	80.0	8.0
	472.22	179.49	55.90	1.21	0.12
	83.56	31.76	9.89	0.21	0.02
	244522.8	46471.0	3618.1	78.1	62.5
	3777.72	717.95	55.90	1.21	0.97
Total	93582.8	35612.8	11114.7	240.0	24.0
	495.81	188.68	58.89	1.27	0.13
	85.46	32.52	10.15	0.22	0.02
	731115.7	139112.4	10854.2	234.4	187.5
	3966.47	754.72	58.89	1.27	1.02

\*\*\*\*\* Notice \*\*\*\*\*

No reference value for the specific enthalpy was specified for material "SO2". In this case, the solver will use a value of zero. Please note that this is different from previous releases, where the reference value was set to  $H_{ref} = T_{ref} * C_p$ .

\*\*\*\*\* Notice \*\*\*\*\*

The Wall Heat Transfer Coefficient written to the results file for Fluid 1 is based on the turbulent wall function coefficient. It is consistent with the Wall Heat Flux, the wall temperature, and the wall Adjacent Temperature (near-wall temperature). If you would like it to be based on a user-specified bulk temperature instead, please set the expert parameter "tbulk for htc = <value>".

Mesh Statistics

Domain Name	Orthog. Angle			Exp. Factor			Aspect Ratio		
	Minimum [deg]			Maximum			Maximum		
Ambiente	35.2 ok			13 ok			8 OK		
	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK	%!	%ok	%OK
Ambiente	0 <1 100			0 <1 100			0 0 100		

Domain Name :Ambiente

Total Number of Nodes = 188748  
 Total Number of Elements = 1095105  
 Total Number of Tetrahedrons = 1095105  
 Total Number of Faces = 23226

Reference Pressure Information

Domain Group: Ambiente

Pressure has not been set at any boundary conditions.  
 The pressure will be set to 0.00000E+00 at the following location:  
 Domain : Ambiente  
 Node : 1 (equation 1)  
 Coordinates : (-1.09319E+03, 1.00000E+02, 0.00000E+00).

Domain Group: Ambiente

Buoyancy has been activated. The absolute pressure will include hydrostatic pressure contribution, using the following reference coordinates: (-1.09319E+03, 1.00000E+02, 0.00000E+00).

```

+-----+
| Multi-Component Specific Enthalpy Diffusion |
+-----+

```

Enthalpy equation assembly for secondary terms derived from multi-component species transport. Molecular and turbulent transport may use either Unity Lewis Number (Le=1) assumption or generic assembly.

Domain Name :Ambiente  
Fluid 1 (Le\_mol=1 ,Le\_trb=1 )

```

+-----+
| Average Scale Information |
+-----+

```

```

Domain Name :Ambiente
Global Length           = 2.1253E+03
MinimumExtent          = 1.2000E+03
MaximumExtent          = 4.0000E+03
Density                = 2.3622E+00
DynamicViscosity       = 1.8310E-05
Velocity               = 2.2200E+00
Advection Time         = 9.5735E+02
  Reynolds Number      = 6.0871E+08
  Speed of Sound       = 3.4659E+02
  Mach Number          = 6.4053E-03
  Thermal Conductivity = 2.6100E-02
  Specific Heat Capacity at Constant Pressure = 1.0044E+03
  Specific Heat Capacity at Constant Volume   = 7.1730E+02
  Specific Heat Ratio   = 1.4003E+00
Prandtl Number         = 7.0462E-01
  Temperature Range    = 7.8000E+00

```

```

+-----+
| Checking for Isolated Fluid Regions |
+-----+

```

No isolated fluid regions were found.

```

+-----+
| The Equations Solved in This Calculation |
+-----+

```

Subsystem : Momentum and Mass

```

U-Mom
V-Mom
W-Mom
P-Mass

```

Subsystem : Heat Transfer

```

H-Energy

```

Subsystem :TurbKE and Diss.K

```

K-TurbKE
E-Diss.K

```

Subsystem : Mass Fractions

```

SO2-Mass Fraction

```

CFD Solver started: Sat Jun 16 08:31:53 2012

```

+-----+
| Convergence History |
+-----+

```

```

+-----+
| Timescale Information |
+-----+

```

Equation	Type	Timescale
U-Mom	Auto Timescale	1.47215E+01
V-Mom	Auto Timescale	1.47215E+01
W-Mom	Auto Timescale	1.47215E+01
P-Mass	Auto Timescale	1.47215E+01
H-Energy	Auto Timescale	1.47215E+01

K-TurbKE	Auto Timescale	1.47215E+01
E-Diss.K	Auto Timescale	1.47215E+01
SO2-Mass Fraction	Auto Timescale	1.47215E+01

OUTER LOOP ITERATION = 1 CPU SECONDS = 6.568E+00

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution
U-Mom	0.00	2.4E-05	3.4E-04	8.0E+04ok
V-Mom	0.00	2.4E-02	6.5E-01	2.6E-03OK
W-Mom	0.00	1.5E-01	1.1E+00	5.6E-04OK
P-Mass	0.00	2.7E-03	8.5E-02	20.08.4E-02 OK
H-Energy	0.00	1.1E-02	9.5E-01	5.6 1.6E-04 OK
K-TurbKE	0.00	1.7E-01	8.2E-01	5.6 3.7E-13 OK
E-Diss.K	0.00	3.0E-02	9.7E-01	11.6 1.2E-13 OK
SO2-Mass Fraction	0.00	1.2E-02	1.0E+00	5.6 2.9E-02 OK

ITERATION = 2 to 344..

OUTER LOOP ITERATION = 345 CPU SECONDS = 1.146E+04

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution
U-Mom	0.97	1.0E-04	1.6E-02	6.6E-03OK
V-Mom	0.97	7.2E-05	8.9E-03	5.3E-03OK
W-Mom	0.97	4.0E-05	2.7E-03	7.0E-03OK
P-Mass	0.98	2.0E-06	1.2E-04	4.8 5.1E-02 OK
H-Energy	0.98	4.8E-06	4.6E-04	5.6 8.3E-05 OK
K-TurbKE	0.95	6.3E-05	1.4E-02	5.6 1.0E-05 OK
E-Diss.K	0.95	6.8E-08	1.5E-05	11.6 1.4E-09 OK
SO2-Mass Fraction	0.93	1.7E-08	1.3E-06	5.6 1.4E-04 OK

Timescale Information		
Equation	Type	Timescale
U-Mom	Auto Timescale	1.47215E+01
V-Mom	Auto Timescale	1.47215E+01
W-Mom	Auto Timescale	1.47215E+01
P-Mass	Auto Timescale	1.47215E+01
H-Energy	Auto Timescale	1.47215E+01
K-TurbKE	Auto Timescale	1.47215E+01
E-Diss.K	Auto Timescale	1.47215E+01
SO2-Mass Fraction	Auto Timescale	1.47215E+01

OUTER LOOP ITERATION = 346 CPU SECONDS = 1.149E+04

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution
U-Mom	0.98	1.0E-04	1.7E-02	6.5E-03OK
V-Mom	0.96	6.9E-05	7.9E-03	5.2E-03OK
W-Mom	0.97	3.8E-05	2.6E-03	6.8E-03OK
P-Mass	0.98	2.0E-06	1.1E-04	4.8 5.0E-02 OK
H-Energy	0.98	4.7E-06	4.6E-04	5.6 8.4E-05 OK
K-TurbKE	0.94	6.0E-05	1.4E-02	5.6 1.1E-05 OK
E-Diss.K	0.94	6.4E-08	1.4E-05	11.6 1.4E-09 OK
SO2-Mass Fraction	0.92	1.6E-08	1.3E-06	5.6 1.4E-04 OK

OUTER LOOP ITERATION = 347 CPU SECONDS = 1.153E+04

Equation	Rate	RMS Res	Max Res	Linear Solution
U-Mom	0.98	9.8E-05	1.7E-02	6.5E-03OK
V-Mom	0.96	6.7E-05	7.5E-03	5.1E-03OK
W-Mom	0.97	3.7E-05	2.6E-03	6.7E-03OK
P-Mass	0.98	2.0E-06	1.1E-04	4.8 4.9E-02 OK
H-Energy	0.98	4.6E-06	4.6E-04	5.6 8.4E-05 OK
K-TurbKE	0.94	5.6E-05	1.3E-02	5.6 1.1E-05 OK
E-Diss.K	0.93	5.9E-08	1.3E-05	11.6 1.5E-09 OK
SO2-Mass Fraction	0.91	1.5E-08	1.3E-06	5.6 1.3E-04 OK

CFD Solver finished: Sat Jun 16 09:36:28 2012  
 CFD Solver wall clock seconds: 3.8750E+03

=====  
 Termination and Interrupt Condition Summary  
 =====

CFD Solver: All target criteria reached  
 (Equation residuals)

=====  
 Boundary Flow and Total Source Term Summary  
 =====

U-Mom		
Boundary	: Ambiente Default	-2.6286E+00
Boundary	: Chamine1	3.5217E-05
Boundary	: Chamine2	2.9454E-06
Boundary	: Chamine3	-2.0141E-05
Boundary	: Jusante	-5.4738E+06
Boundary	: LadoD	-8.4176E+08
Boundary	: LadoE	8.4736E+08
Boundary	: Montante	5.2752E-04
Boundary	: Solo	-9.9338E+04
Domain Imbalance :		2.6712E+04
Domain Imbalance, in %:		0.0006 %
V-Mom		
Boundary	: Ambiente Default	-1.3399E+03
Boundary	: Chamine1	-1.2245E-04
Boundary	: Chamine2	2.2311E-05
Boundary	: Chamine3	-1.1569E-04
Boundary	: Jusante	-5.1445E+08
Boundary	: LadoD	2.9920E-09
Boundary	: Montante	5.1485E+08
Boundary	: Solo	-4.5458E+05
Domain Imbalance :		-5.6857E+04
Domain Imbalance, in %:		-0.0012 %
W-Mom		
Boundary	: Ambiente Default	-3.3772E+00
Boundary	: Camada	-4.7868E+09
Boundary	: Chamine1	4.7303E+02
Boundary	: Chamine2	4.6993E+02
Boundary	: Chamine3	4.7616E+02
Boundary	: Jusante	3.0864E+06
Boundary	: LadoD	-5.4294E-10
Boundary	: Montante	-1.9534E-01
Boundary	: Solo	6.0225E+07
Domain Src (Neg) :	Ambiente	-9.2831E+07
Domain Src (Pos) :	Ambiente	4.8164E+09
Domain Imbalance :		3.9910E+03
Domain Imbalance, in %:		0.0001 %
P-Mass		
Boundary	: Chamine1	2.8050E+01
Boundary	: Chamine2	2.8050E+01
Boundary	: Chamine3	2.8050E+01

Boundary	: Jusante	-1.5502E+07
Boundary	: Montante	1.5494E+07
Domain Imbalance :		-7.4055E+03
Domain Imbalance, in %:		-0.0478 %

H-Energy		
Boundary	: Canada	-1.6466E+07
Boundary	: Chamine1	3.7184E+06
Boundary	: Chamine2	3.7184E+06
Boundary	: Chamine3	3.7184E+06
Boundary	: Jusante	4.4313E+10
Boundary	: LadoD	-7.2952E+05
Boundary	: LadoE	6.8702E+06
Boundary	: Montante	-4.4597E+10
Boundary	: Solo	3.5760E+08
Domain Imbalance :		7.5089E+07
Domain Imbalance, in %:		0.1684 %

SO2-Mass Fraction		
Boundary	: Chamine1	1.4726E-02
Boundary	: Chamine2	1.4726E-02
Boundary	: Chamine3	1.4726E-02
Boundary	: Jusante	-4.4137E-02
Domain Imbalance :		4.1661E-05
Domain Imbalance, in %:		0.0944 %

=====

Wall Force and Moment Summary

=====

## Notes:

1. Pressure integrals exclude the reference pressure. To include it, set the expert parameter 'include pref in forces = t'.

Pressure Force On Walls			
X-Comp.Y-Comp.Z-Comp.			
Domain Group: Ambiente			
Ambiente Default	2.5597E+001	3.352E+03	8.5029E+01
Canada	0.0000E+000	0.0000E+00	-1.0490E+11
LadoD	-3.2064E+10	1.1391E-07	-1.1546E-08
LadoE	3.2058E+10	0.0000E+00	0.0000E+00
Solo	0.0000E+000	0.0000E+00	-6.0225E+07
Domain Group Totals :	-5.6198E+06	1.3352E+03	-1.0496E+11

Viscous Force On Walls			
X-Comp.Y-Comp.Z-Comp.			
Domain Group: Ambiente			
Ambiente Default	6.8918E-024	6.903E+00	1.4957E+00
Canada	0.0000E+000	0.0000E+00	9.7005E+03
LadoD	1.2510E+04	-9.0696E-16	9.7354E-16
LadoE	7.4597E+03	0.0000E+00	0.0000E+00
Solo	9.9338E+044	5.458E+05	-2.2283E-12
Domain Group Totals :	1.1931E+05	4.5458E+05	9.7020E+03

Pressure Moment On Walls			
X-Comp.Y-Comp.Z-Comp.			
Domain Group: Ambiente			
Ambiente Default	-3.9631E+049	3.126E+04	-1.4609E+06
Canada	-2.0975E+14	-1.1476E+14	0.0000E+00
LadoD	-1.1396E-04	-2.5524E+13	6.4129E+13

```

LadoE      0.0000E+00  2.5524E+13  -6.4107E+13
Solo      -1.9518E+11 -6.8261E+10  0.0000E+00
-----
Domain Group Totals :      -2.0994E+14  -1.1483E+14  2.2559E+10

```

```

+-----+
| Viscous Moment On Walls |
+-----+

```

```
X-Comp.Y-Comp.Z-Comp.
```

```
Domain Group: Ambiente
```

```

Ambiente Default      -1.1453E-011.6392E+03  -5.1379E+03
Camada                3.6843E+071.0460E+07  0.0000E+00
LadoD                 1.8852E-12  -5.7646E+05  -4.7005E+07
LadoE                 0.0000E+00  1.1092E+05  -2.4432E+07
Solo                 -3.8094E-09 -2.2139E-09  -9.3396E+08
-----
Domain Group Totals :      3.6843E+07  9.9962E+06  -1.0054E+09

```

```

+-----+
| Locations of Maximum Residuals |
+-----+

```

Equation	Node #	X	Y	Z
U-Mom	6856	-1.437E+03	3.621E+03	0.000E+00
V-Mom	14144	-1.349E+03	3.505E+03	7.620E+01
W-Mom	39188	-1.491E+03	3.791E+03	4.596E+02
P-Mass	30913	-1.296E+03	3.828E+03	4.237E+02
H-Energy	7653	-9.445E+02	3.299E+03	0.000E+00
K-TurbKE	6856	-1.437E+03	3.621E+03	0.000E+00
E-Diss.K	6856	-1.437E+03	3.621E+03	0.000E+00
SO2-Mass Fraction	7021	-1.047E+03	3.012E+03	0.000E+00

```

+-----+
| Peak Values of Residuals |
+-----+

```

Equation	Loop #	Peak Residual	Final Residual
U-Mom	4	1.13697E-02	9.79192E-05
V-Mom	1	2.35458E-02	6.66508E-05
W-Mom	4	1.99642E-01	3.72074E-05
P-Mass	3	2.79707E-02	1.95205E-06
H-Energy	1	1.09747E-02	4.55876E-06
K-TurbKE	1	1.65485E-01	5.57536E-05
E-Diss.K	1	2.95116E-02	5.92491E-08
SO2-Mass Fraction	1	1.15950E-02	1.45326E-08

```

+-----+
| False Transient Information |
+-----+

```

Equation	Type	Elapsed Pseudo-Time
U-Mom	Auto	5.10835E+03
V-Mom	Auto	5.10835E+03
W-Mom	Auto	5.10835E+03
P-Mass	Auto	5.10835E+03
H-Energy	Auto	5.10835E+03
K-TurbKE	Auto	5.10835E+03
E-Diss.K	Auto	5.10835E+03
SO2-Mass Fraction	Auto	5.10835E+03

```

+-----+
| Average Scale Information |
+-----+

```

```

Domain Name :Ambiente
Global Length      = 2.1253E+03
MinimumExtent     = 1.2000E+03
MaximumExtent     = 4.0000E+03
Density           = 1.1651E+00
DynamicViscosity  = 1.8310E-05
Velocity          = 3.6687E+00
Advection Time    = 5.7930E+02
Reynolds Number  = 4.9614E+08
Speed of Sound    = 3.4673E+02
Mach Number       = 1.0581E-02
Thermal Conductivity = 2.6100E-02
Specific Heat Capacity at Constant Pressure = 1.0044E+03
Specific Heat Capacity at Constant Volume   = 7.1730E+02

```

Specific Heat Ratio = 1.4003E+00  
 Prandtl Number = 7.0462E-01  
 Temperature Range = 1.3839E+02

Variable Range Information

Domain Name :Ambiente

Variable Name	min	max
Density	8.15E-01	1.20E+00
Specific Heat Capacity at Constant Pressure	1.00E+03	1.00E+03
DynamicViscosity	1.83E-05	1.83E-05
ThermalConductivity	2.61E-02	2.61E-02
IsothermalCompressibility	9.86E-06	1.13E-05
StaticEntropy	-1.38E+01	3.70E+02
Air.Density	8.15E-01	1.20E+00
Air.Specific Heat Capacity at Constant Pres	1.00E+03	1.00E+03
Air.DynamicViscosity	1.83E-05	1.83E-05
Air.Thermal Conductivity	2.61E-02	2.61E-02
Air.IsothermalCompressibility	9.86E-06	1.13E-05
Air.StaticEnthalpy	-6.43E+03	1.33E+05
Air.StaticEntropy	-1.38E+01	3.70E+02
SO2.Density	1.80E+00	2.66E+00
SO2.Specific Heat Capacity at Constant Pres	6.25E+02	6.25E+02
SO2.Dynamic Viscosity	1.65E-05	1.65E-05
SO2.Thermal Conductivity	7.70E-03	7.70E-03
SO2.Isothermal Compressibility	9.86E-06	1.13E-05
SO2.Static Enthalpy	1.16E+04	9.81E+04
SO2.Static Entropy	4.62E+01	2.85E+02
Velocity u	-1.17E+01	1.15E+01
Velocity v	-4.53E+00	1.06E+01
Velocity w	-8.61E+00	1.93E+01
Pressure	-3.48E+01	6.87E+02
TurbulenceKinetic Energy	2.88E-17	2.33E+00
TurbulenceEddyDissipation	4.98E-18	1.21E+02
EddyViscosity	7.22E-18	2.76E+00
Temperature	2.92E+02	4.30E+02
StaticEnthalpy	-6.43E+03	1.33E+05
Air.Mass Fraction	9.99E-01	1.00E+00
SO2.Conservative Mass Fraction	-1.27E-06	5.25E-04
SO2.Mass Fraction	0.00E+00	5.25E-04

CPU Requirements of Numerical Solution - Total

Subsystem Name	Discretization		Linear Solution	
	(secs.)	%total)	(secs.)	%total)
Momentum and Mass	5.43E+03	46.9 %	5.94E+02	5.1 %
Heat Transfer	9.38E+02	8.1 %	2.26E+02	2.0 %
TurbKE and Diss.K	1.21E+03	10.5 %	5.39E+02	4.7 %
Mass Fractions	9.24E+02	8.0 %	2.27E+02	2.0 %
Subsystem Summary	8.50E+03	73.5 %	1.59E+03	13.7 %
Variable Updates	1.42E+03	12.2 %		
Search Calculations	1.41E-01	0.0 %		
File Reading	5.30E-01	0.0 %		
File Writing	6.93E+00	0.1 %		
Miscellaneous	5.88E+01	0.5 %		
Total	1.16E+04			

Job Information

Host computer: (PID:1436)  
 Par. Process: Master running on mesh partition: 1  
 Job finished: Sat Jun 16 09:36:31 2012  
 Total CPU time: 3.877E+03 seconds  
 or: ( 0: 1: 4: 37.140 )  
 ( Days: Hours: Minutes: Seconds )

Host computer: (PID:1452)  
 Par. Process: Slave running on mesh partition: 2  
 Job finished: Sat Jun 16 09:36:31 2012  
 Total CPU time: 3.861E+03 seconds  
 or: ( 0: 1: 4: 20.666 )  
 ( Days: Hours: Minutes: Seconds )

Host computer: (PID:3768)  
Par. Process: Slave running on mesh partition: 3  
Job finished: Sat Jun 16 09:36:31 2012  
Total CPU time: 3.831E+03 seconds  
or: ( 0: 1: 3: 50.527 )  
( Days: Hours: Minutes: Seconds )  
Total wall clock time: 3.883E+03 seconds  
or: ( 0: 1: 4: 43.000 )  
( Days: Hours: Minutes: Seconds )

--> Master-Partition Nr. 1 reaches final synchronization point!  
--> Slave-Partition Nr. 2 reaches final synchronization point!  
--> Slave-Partition Nr. 3 reaches final synchronization point!  
End of solution stage.

```
+-----+  
| The results from this run of the ANSYS CFX solver have been  
| written to  
| C:/Users/PC/AppData/Local/Temp/Modelo_Caldeiras_Alumar_3620_wor- |  
| king/dp0/CFX/CFX/work1/Fluid Flow_028.res  
+-----+
```

This run of the ANSYS CFX solver has finished.