

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

CENTRO TECNOLÓGICO

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

LETÍCIA COSTA RIBEIRO

LUCAS PERPÉTUO MOREIRA

**PROPOSTA DE APROVEITAMENTO EXERGÉTICO EM UM PROCESSO
INDUSTRIAL SEGUIDO DE ANÁLISE DE DISPERSÃO DE POLUENTES**

VITÓRIA

2014

LETÍCIA COSTA RIBEIRO

LUCAS PERPÉTUO MOREIRA

**PROPOSTA DE APROVEITAMENTO EXERGÉTICO EM UM PROCESSO
INDUSTRIAL SEGUIDO DE ANÁLISE DE DISPERSÃO DE POLUENTES**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Mecânico.

Orientador: Prof. Dr. Rogério Silveira de Queiroz.

VITÓRIA

2014

LETÍCIA COSTA RIBEIRO

LUCAS PERPÉTUO MOREIRA

**PROPOSTA DE APROVEITAMENTO EXERGÉTICO EM UM PROCESSO
INDUSTRIAL SEGUIDO DE ANÁLISE DE DISPERSÃO DE POLUENTES**

Projeto de Graduação apresentado ao Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Título de Engenheiro Mecânico.

Aprovado em 30 de Julho de 2014.

COMISSÃO EXAMINADORA

Prof. Dr. Rogério Silveira de Queiroz
Universidade Federal do Espírito Santo
Orientador

Prof. Dr. José Joaquim Conceição Soares Santos
Universidade Federal do Espírito Santo

Prof. Me. Elias Antonio Dalvi
Universidade Federal do Espírito Santo

AGRADECIMENTO

Agradecemos às nossas famílias, por todo o apoio que nos deram ao longo dessa jornada, em especial aos nossos pais por serem nossos primeiros professores na escola da vida.

Ao nosso orientador, Rogério Queiroz, agradecemos por toda a instrução, dedicação e amizade que conosco compartilhou ao longo desses dois anos de projeto.

Aos nossos amigos pelos momentos de estudo e de diversão compartilhados, que com certeza colaboraram para que tudo se tornasse mais fácil.

RESUMO

Em função da necessidade energética mundial que se sofre atualmente, realizou-se este trabalho, visando propor uma alternativa de aproveitamento de exergia juntamente com uma análise de emissão de poluentes, que é outra preocupação global. Inicialmente apresenta - se um histórico que mostra a evolução do consumo de energia, e uma perspectiva de necessidade energética, que embasa a motivação desse trabalho. Será estudado o caso de um processo industrial termo-químico, onde os produtos de combustão compõem uma mistura de gases que possui elevada disponibilidade energética na forma de energia térmica. É parte dessa energia que se propõe aproveitar nesse trabalho. Parte dos gases presentes na mistura são nocivos à saúde e meio ambiente, e sua concentração precisa ser avaliada. No presente trabalho o NO_x será o parâmetro utilizado para avaliar a qualidade do ar. Para a avaliação ambiental foi realizado, uma estimativa de concentração de NO_x nas estações de medição presentes na região próxima à Usina. Para essa estimativa foi utilizado o software AERMOD. Ao final, conclui-se apresentando uma relação entre a potência aproveitada e a concentração de NO_x que será emitida ao realizar esse aproveitamento, avaliando se a proposta é aceitável em relação às Resoluções ambientais existentes atualmente, e uma análise para determinar a parcela de NO_x que corresponde à NO_2 .

Palavras – chave: Análise Exergética. AERMOD. Emissão de NO_x . Dispersão de NO_x . Formação de NO_x .

ABSTRACT

Due to actual global energy need worldwide, this work was realized looking for an alternative usage of exergy purposal and an analysis of pollutant emissions, which also is another global problem. Initially is shown a track record that presents the evolution of energy consumption, and a perspective of energy requirement, which underlies the motivation of this work. The case of a thermo-chemical process industry where the combustion products comprise a mixture of gases that has higher energy available in the form of thermal energy will be studied. It is part of its energy that is proposed to reutilize at this work. A part of the gases in the mixture is harmful to health and environment, and its concentration needs to be evaluated. In the present work, the NO_x will be the parameter used to evaluate the quality of the air. For environmental assessment was estimated the NO_x level present in the measurement stations in the region near the plant. For this estimation the AERMOD software was used. Finally, we conclude by presenting a relationship between the available power and the concentration of NO_x that will be issued, to assess whether the proposal is acceptable in relation to currently existing environmental resolutions, and discussing an analysis to determine the amount of NO_x that corresponds to NO₂.

Keywords: Exergy Analysis. AERMOD. Emission of NO_x. Dispersion of NO_x. NO_x formation.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Constituintes Gasosos da Atmosfera	30
Tabela 2 - Concentrações de SO ₂ e de NO ₂ que determinam a Qualidade Do Ar...	37
Tabela 3 - Classes de estabilidade segundo Pasquill	53
Tabela 4 - Formulação de Briggs para σ_y e σ_z segundo as classes de estabilidade de Pasquill.....	53
Tabela 5 - Resultados dos Cálculos Estequiométricos com dados de Emissão	73
Tabela 6: Frações parciais dos reagentes	74
Tabela 7 – Máximas concentrações de NO _x estimadas para valores de potência reaproveitados.....	80
Tabela 8 – Velocidade de emissão da pluma (m/s) para as duas chaminés adotadas	81
Tabela 9 – Faixa de velocidade típica para cada estação no período analisado	84
Tabela 10 – Distância entre estação e fonte emissora, e relação entre NO ₂ e NO _x ..	84
Tabela 11 - Máximas concentrações de NO _x estimadas para valores de potência reaproveitados.....	85

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Energia Primária no Brasil em 2004.....	20
Figura 2: Oferta de Energia Primária no Brasil em 2012.....	21
Figura 3: Consumo Final dos principais energéticos no Brasil em 1970.	22
Figura 4: Evolução dos consumos finais dos principais energéticos brasileiros entre 1974 e 1984.	23
Figura 5: Participações dos principais energéticos no consumo final no Brasil em 1985.	24
Figura 6: Participações dos principais energéticos no consumo final no Brasil em 1993.	24
Figura 7: Evolução dos consumos finais dos principais energéticos do Brasil, no período 1994-1998.....	25
Figura 8: Evolução dos Consumos Finais dos Principais Energéticos do Brasil entre 1999 e 2004.	26
Figura 9: Evolução da estrutura da oferta de energia no Brasil entre 1970 e 2030...	27
Figura 10: Evolução da participação das fontes renováveis na matriz energética Brasileira.	28
Figura 11: Evolução da demanda energética de Gás Natural no Brasil entre 1970 e 2030.	29
Figura 12: Evolução das emissões específicas de CO ₂ no Brasil entre 2005 e 2030, em tCO ₂ /tep, com base na oferta interna de energia.....	31
Figura 13: Processo Industrial Atual.....	34
Figura 14: Processo Industrial Proposto.	34
Figura 15: Conversão do NO em NO ₂ no ambiente.	39
Figura 16 :Representação da CLP e da atmosfera livre na Troposfera Fonte: Adaptado de Stull (1988)	41
Figura 17: Estrutura da Camada Limite Planetária.....	42
Figura 18: Influência da estabilidade atmosférica na forma da pluma. Fonte: Moraes, 2004	46
Figura 19 - Sistema de Coordenadas demonstrativo para uma Pluma Gaussiana...	50
Figura 20: Região de reflexão no modelo gaussiano Fonte: Adaptado de Cooper (2002).....	51

Figura 21: Curvas de variação de σ_y e σ_z com a distância segundo as classes de estabilidade de Pasquill.....	52
Figura 22 - Altura efetiva de emissão.....	54
Figura 23: Estrutura do software AERMOD.....	58
Figura 24: Escalas de altura nos dois estados de pluma considerados pelo AERMOD	60
Figura 25: Tratamento do terreno pelo AERMOD e construção do fator de ponderação (f).....	62
Figura 26 Representação esquemática da modelagem de uma pluma na CLC pelo AERMOD Fonte: Adaptado de EPA (2004a).....	63
Figura 27 Tipos de fontes utilizadas pelo AERMOD para modelagem na CLC Fonte: Adaptado de EPA (2004a)	64
Figura 28: Mapa de Localização das Estações de Medição	69
Figura 29: Valores de α e A para a localidade estudada.....	83

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Medições horárias de concentração de NO _x nos meses de Junho e Julho - Estação 2	70
Gráfico 2: Medições horárias de concentração de NO _x nos meses de Junho e Julho - Estação 3.	70
Gráfico 3: Medições horárias de concentração de NO _x nos meses de Junho e Julho - Estação 4.	70
Gráfico 4: Medições horárias de concentração de CO nos meses de Junho e Julho - Estação 2	71
Gráfico 5: Medições horárias de concentração de CO nos meses de Junho e Julho - Estação 3	71
Gráfico 6: Medições horárias de concentração de CO nos meses de Junho e Julho - Estação 4	71
Gráfico 7: Medições horárias de concentração de SO ₂ nos meses de Junho e Julho - Estação 2	72
Gráfico 8: Medições horárias de concentração de SO ₂ nos meses de Junho e Julho - Estação 3	72
Gráfico 9: Medições horárias de concentração de SO ₂ nos meses de Junho e Julho - Estação 4.	72
Gráfico 10: Exergia dos reagentes e produtos em dois níveis de temperatura	76
Gráfico 11: Relação entre a máxima extração de exergia possível nos gases de exaustão e a disponibilidade dos reagentes.....	77
Gráfico 12: Contribuição de cada elemento para a disponibilidade exergética dos produtos a 482K	78
Gráfico 13: Contribuição de cada elemento para a disponibilidade exergética dos produtos a 393K	78
Gráfico 14: Relação NO ₂ /NO _x em função da distância entre a fonte	85

LISTA DE SIGLAS

AERMOD	Software computacional para determinação de concentrações ambientais
AERMET	Pré-processador meteorológico do AERMOD
AERMAP	Pré-processador de terreno do AERMOD
AIE	Agência Internacional de Energia
CD144	<i>Card Deck 144 Format</i>
CLA	Camada Limite Atmosférica
CLC	Camada Limite Convectiva
CLP	Camada Limite Planetária
CR	Camada Residual
CLS	Camada Limite Superficial
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CONSERVE	Programa de Conservação de Energia no Setor Industrial
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
EPA	<i>Environmental Protection Agency</i>
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EUA	Estados Unidos da América
fdp	Função densidade de probabilidade
MME	Ministério de Minas e Energia
SCRAM	<i>Suport Center for Regulatory Models</i>
SAMSON	<i>Solar and Meteorological Surface Observation Network</i>

NO_x Mistura de óxido nítrico (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO₂)

PRONAR Programa Nacional de qualidade do Ar

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Parâmetro que considera as constantes de velocidade k_1 , k_2 e a concentração de O_3
C	Concentração média de um poluente qualquer
$C_{c,s}\{x_r, y_r, z_p\}$	Concentração em função da pluma que desvia conforme o terreno
$C_{c,s}\{x_r, y_r, z_r\}$	Concentração em função da pluma que impacta o terreno
$C_d\{x, y, z\}$	Contribuição da fonte direta para a concentração na CLC
$C_p\{x, y, z\}$	Contribuição da fonte penetrada para a concentração na CLC
$C_r\{x, y, z\}$	Contribuição da fonte indireta para a concentração na CLC
$C_T\{x_r, y_r, z_r\}$	Concentração total
d	Diâmetro da chaminé
Ex	Exergia
Ex_c	Exergia cinética
Ex_f	Exergia física
Ex_{fluxo}	Exergia de fluxo
Ex_p	Exergia dos produtos
Ex_{pot}	Exergia dos produtos
Ex_q	Exergia química
Ex_R	Exergia dos reagentes
f	Fator de ponderação da pluma
f_p	Fração mássica da pluma na CLC

F_b	Fluxo de empuxo (m^4/s^3)
F_m	Fluxo de quantidade de movimento (m^4/s^2)
F_y	Função de distribuição horizontal
g	Aceleração da gravidade
h	Entalpia
h_0	Entalpia em (T_0, P_0)
h_f^0	Entalpia de formação
h_r	Altura específica do receptor
h_s	Altura física da chaminé
H	Altura efetiva da chaminé
H_c	Altura crítica de divisão
k_1	Constante da reação do NO com O_3
k_3	Constante da reação de dissociação do NO_2 com O_2
$\dot{m}$	Vazão mássica
$\dot{n}_p$	Vazão molar total de produtos
$\dot{n}_R$	Vazão molar total de reagentes
N	Frequência de Brunt-Vaisala
P	Função densidade de probabilidade
P_0	Pressão no estado de referência
P_a	Pressão atmosférica (mbar)
P_y	Função densidade de probabilidade que descreve a concentração lateral

P_z	Função densidade de probabilidade que descreve a concentração vertical
Q	Vazão mássica de emissão
R	Constante universal dos gases
s	Entropia
s^0	Entropia padrão
s_0	Entropia em (T_0, P_0)
s'	Índice de estabilidade atmosférica
S	Termos fontes e sumidouros
t	Tempo
t'	Tempo inicial da análise
T_0	Temperatura no estado de referência
T_c	Temperatura dos gases na saída da chaminé
T_{amb}	Temperatura ambiente
$\bar{u}_i$	Vetor velocidade média do vento nas direções do x, y e z
$\overline{u'_i c'_i}$	Fluxos turbulentos de concentração
u_p	Velocidade média do vento na altura efetiva da chaminé
u_s	Velocidade média do vento na altura física da chaminé
v	Velocidade do vento
v_c	Velocidade do gás ao sair da chaminé
V	Velocidade do fluxo
x	Distância entre a fonte emissora e a estação
x'	Posição inicial da partícula

x_i	Direções x, y e z
y_i	Fração molar
z	Altura
z_0	Rugosidade Superficial
z_i	Altura de mistura
z_{ieff}	Altura da superfície refletora no CLS ou na camada estável acima da CLC
z_p	Altura do receptor acima do nível do terreno
z_r	Altura do receptor considerando também a altura do terreno
z_t	Altura da elevação do terreno
β_1	Fator de arrastamento
Δh_c	Diferença entre as alturas efetiva e física da chaminé
λ_j	Coeficiente de ponderação para a corrente de ar ascendente (j = 1) e descendentes (j = 2)
σ_b	Coeficiente da dispersão induzida pela flutuabilidade da pluma
σ_y	Coeficiente de dispersão lateral
σ_{ya}	Coeficiente horizontal da dispersão causada pela turbulência ambiental
σ_z	Coeficiente de dispersão vertical
σ_{za}	Coeficiente vertical da dispersão causada pela turbulência ambiental
σ_{zp}	Dispersão total para a fonte penetrada
σ_{zj}	Dispersão total vertical para correntes ascendentes e descendentes (j=1 e 2, respectivamente), para fontes diretas e indiretas
φ	Fração mássica da pluma abaixo de H_c

ψ_{dj} Altura total da pluma de fonte direta

ψ_{rj} Altura total da pluma de fonte indireta

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	20
1.1	NECESSIDADE ENERGÉTICA	20
1.1.1	PANORÂMA BRASILEIRO – EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA	21
1.1.1.1	DE 1970 À 1973	21
1.1.1.2	DE 1974 À 1984	22
1.1.1.3	DE 1985 À 1993	24
1.1.1.4	DE 1994 À 1998	25
1.1.1.5	DE 1999 À 2005	25
1.1.2	PANORÂMA BRASILEIRO – PROJEÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA	26
1.1.3	PANORÂMA BRASILEIRO – CONSUMO DE GÁS NATURAL	28
1.2	POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA	29
1.2.1	POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA – CONTRIBUIÇÃO DO GÁS NATURAL.....	32
1.3	CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA	33
1.3.1	PROCESSO INDUSTRIAL ANALISADO.....	34
1.3.1.1	DISPERSÃO DOS GASES DE EXAUSTÃO	35
1.4	OBJETIVO	35
2	ANÁLISE TEÓRICA.....	36
2.1	ÓXIDOS DE NITROGÊNIO (NOx)	36
2.1.1	FORMAÇÃO DE NO	37
2.1.2	FORMAÇÃO DE NO ₂	38

2.2	DISPERSÃO ATMOSFÉRICA	40
2.2.1	FATORES METEOROLÓGICOS QUE INFLUENCIAM A DISPERSÃO	40
2.2.1.1	CAMADA LIMITE PLANETÁRIA	40
2.2.1.1.1	ESTRUTURA DA CAMADA LIMITE PLANETÁRIA.....	41
2.2.1.2	VENTOS	44
2.2.1.3	INVERSÃO TÉRMICA.....	44
2.2.1.4	ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA	45
2.2.2	MODELOS DE DISPERSÃO.....	47
2.2.2.1	MODELO EULERIANO	48
2.2.2.2	MODELO LAGRANGEANO	48
2.2.2.3	MODELO DE PLUMA GAUSSIANO	49
2.2.2.3.1	COEFICIENTES DE DISPERSÃO	52
2.2.2.3.2	ALTURA EFETIVA	54
2.3	DESCRIÇÃO DO AERMOD.....	57
2.3.1	AERMET	58
2.3.2	AERMAP	59
2.3.3	MODELAGEM DO AERMOD	60
2.4	DEFINIÇÃO DE EXERGIA.....	65
2.4.1	DEFINIÇÃO MATEMÁTICA DE EXERGIA PARA UM VOLUME DE CONTROLE	66
3	REGULAMENTAÇÃO PARA EMISSÃO DE POLUENTES.....	68
4	DADOS DE EMISSÃO DE POLUENTES	69
5	MODELAGEM DA COMBUSTÃO NO PROCESSO ANALISADO	

6	DISPONIBILIDADE EXERGÉTICA DOS GASES.....	75
6.1	VARIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE EM FUNÇÃO DA EXTRAÇÃO MÁSSICA.....	78
7	RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA APROVEITADA E EMISSÃO DE GASES.....	80
8	DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE NO₂.....	82
9	CONSIDERAÇÕES FINAIS	86
10	REFERÊNCIAS.....	88

1 INTRODUÇÃO

1.1 NECESSIDADE ENERGÉTICA

O crescente aumento no consumo de energia é uma grande preocupação mundial há algum tempo. Segundo previsões feitas pela Agência Internacional de Energia (AIE), a demanda mundial de energia primária, que é aquela que existe de forma natural na natureza, deverá aumentar em um terço entre 2010 e 2035.

Em geral, os países emergentes serão os maiores responsáveis pelo aumento da demanda por energia primária, e no caso do Brasil a previsão é de que essa demanda cresça 78% até 2035.

Com o intuito de solucionar o problema da demanda energética mundial os estados passaram a investir mais na produção de energia utilizando fontes renováveis tais como, solar, hidráulica, de biomassa e eólica. Além disso, muitos avanços foram realizados ao longo dos anos buscando otimizar os processos industriais e aproveitar ao máximo a capacidade de geração de energia disponível em cada um deles.

As Figuras 1 e 2 ilustram por meio de gráficos, a participação de cada fonte na oferta primária de energia em 2004 e uma mais atual em 2012.

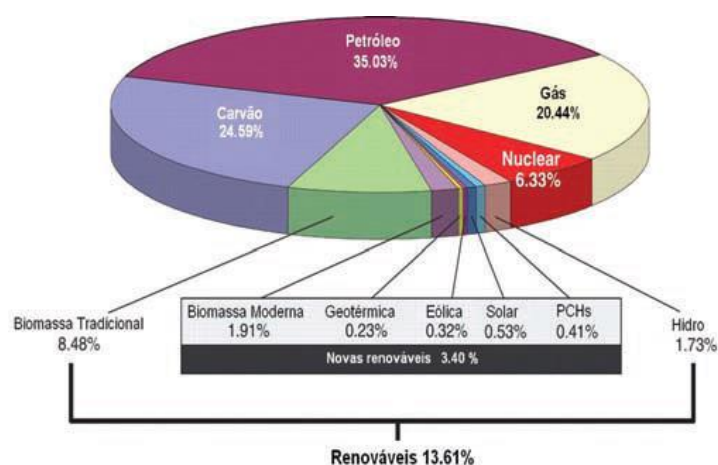


Figura 1: Energia Primária no Brasil em 2004.

Fonte: Goldemberg, José (2009). **Biomassa e Energia**.

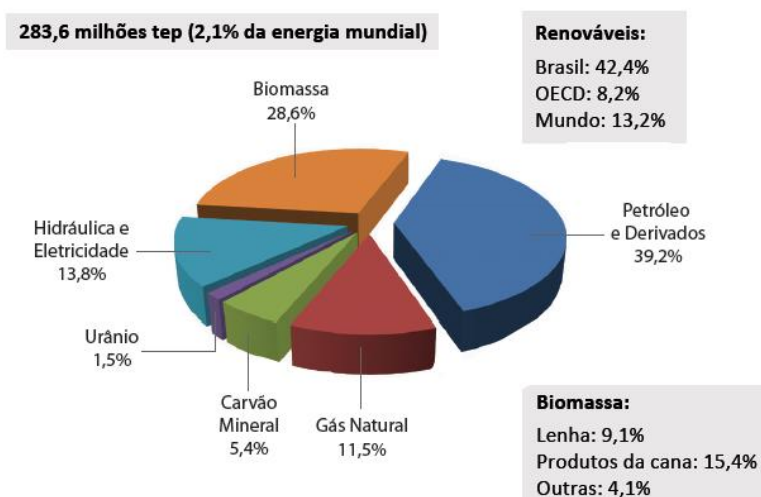


Figura 2: Oferta de Energia Primária no Brasil em 2012.

Fonte: Resenha Energética Brasileira do MME (2013).

1.1.1.1 PANORÂMA BRASILEIRO – EVOLUÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA

A seguir, para entendermos as projeções do consumo de energia no Brasil, realizamos uma retrospectiva da situação energética do Brasil por um período de 35 anos que partirá de 1970 até 2005. Para facilitar a análise o período será subdividido em 5 “subperíodos”: de 1970 à 1973, de 1974 à 1984, de 1985 à 1993, de 1994 à 1998, e de 1999 à 2005.

1.1.1.1.1 DE 1970 À 1973

Entre 1970 e 1973 o consumo final de energia teve um crescimento de 22,9%. Conforme pode ser observado na Figura 3, em 1970 a lenha representava 45,6% do consumo final do país, sendo o principal energético utilizado. Essa representativa

parcela no consumo era devido à elevada taxa da população que residia no campo, assim como o baixo rendimento no uso, demandando quantidades elevadas de energia final para o atendimento dos requisitos de energia útil. Ao longo dos anos seguintes, no entanto, a participação desse energético foi sendo reduzida, atingindo 35,4% em 1973.

Em contrapartida, o petróleo e seus derivados que representavam em 1970 37,9% do consumo final de energia teve um crescimento nessa participação, atingindo aproximadamente 46,7% do consumo final em 1973.

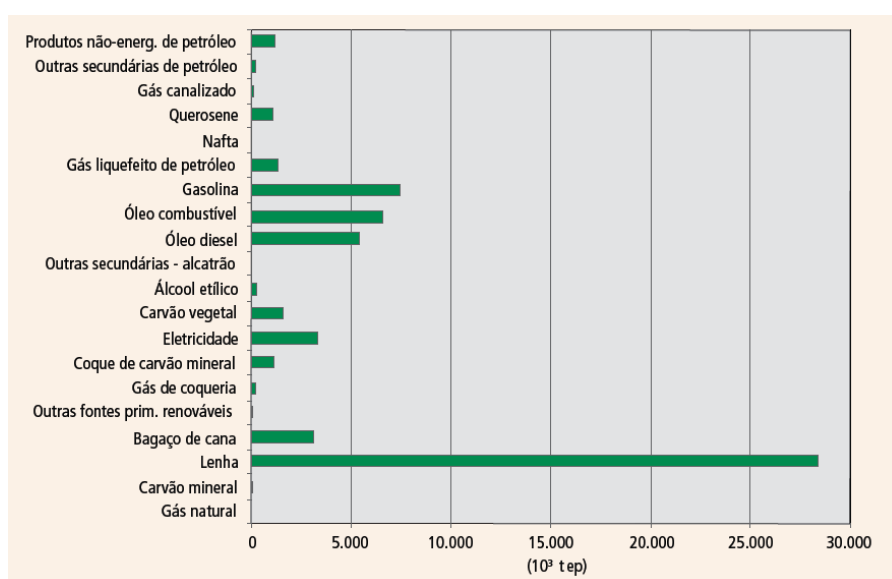


Figura 3: Consumo Final dos principais energéticos no Brasil em 1970.

Fonte: MME, 2005.

1.1.1.2 DE 1974 À 1984

O período entre 1974 e 1984 foi marcado pelos efeitos na economia interna dos dois choques de preços do petróleo no mercado internacional já que a maior parte do consumo interno de petróleo, na época, era oriunda de importações.

Como consequência da elevada dependência externa e dos efeitos negativos sobre a balança comercial, houve um crescimento da utilização das fontes nacionais de energia ao longo dos anos considerados.

Nesse período houve, em 1975, a criação do PROALCOOL e o acordo de cooperação na área nuclear firmado com a Alemanha que previa a instalação de oito reatores PWR de 1.300 MW cada no país, em 1981, a criação do Programa de Conservação de Energia no Setor Industrial (CONSERVE), o início da operação da Usina Hidrelétrica Tucuruí, da Eletronorte e a conclusão da primeira parte do sistema de transmissão Norte-Nordeste que permitia a transferência de energia da bacia amazônica para a região Nordeste em 1984, além do início da operação da Usina Hidrelétrica de Itaipu, com 12.600 MW de capacidade instalada e 18 unidades geradoras de 700 MW cada, onde a 18ª entrou em operação em 9 de abril de 1991.

E nesse contexto foi possível observar um forte crescimento dos consumos da eletricidade, do bagaço de cana e do álcool etílico em contraste com as quedas de participação dos derivados de petróleo (atingindo 41,2%, após um pico de 53,1% em 1979) e da lenha (chegando a 19,0%, após expressivos 45,6% em 1970). Os demais energéticos apresentaram participação reduzida, conforme pode ser observado na Figura 4.

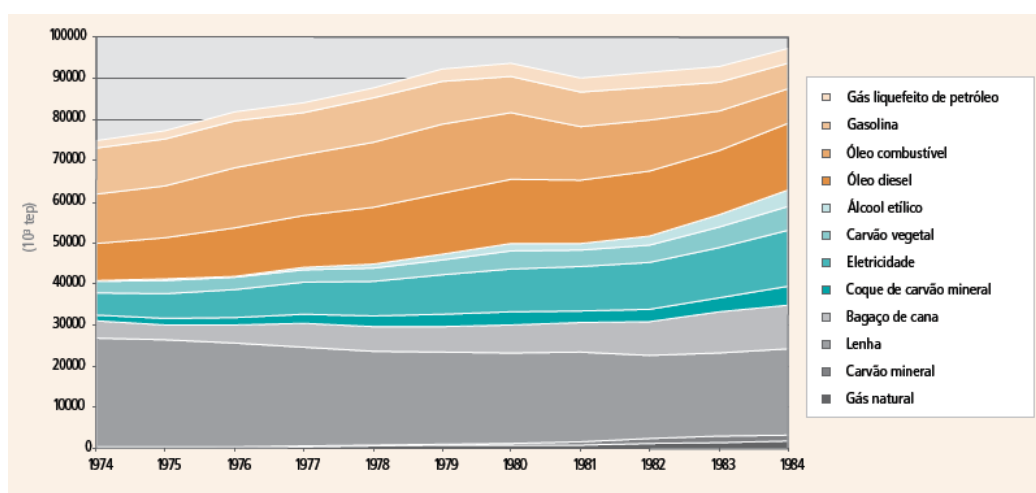


Figura 4: Evolução dos consumos finais dos principais energéticos brasileiros entre 1974 e 1984.

Fonte: MME, 2005.

1.1.1.3 DE 1985 À 1993

Entre 1985 e 1993 o consumo final no país teve um crescimento de apenas 15,7% no período (média de 1,8% a.a.). As figuras 5 e 6 mostram as participações dos principais energéticos no consumo final nos anos considerados, podendo destacar a manutenção do processo de redução da participação da lenha e a continuidade do crescimento da participação da energia elétrica.

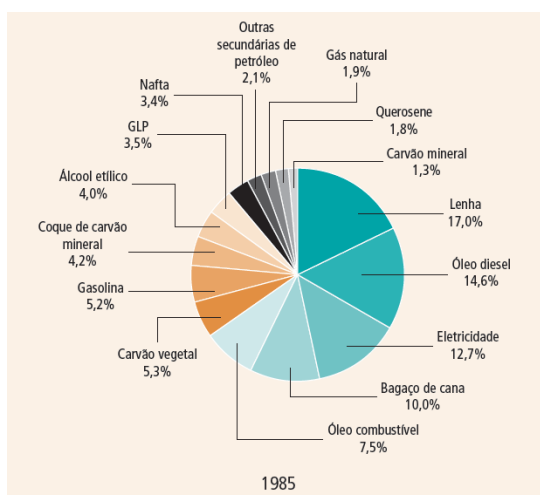


Figura 5: Participações dos principais energéticos no consumo final no Brasil em 1985.

Fonte: MME,2005.

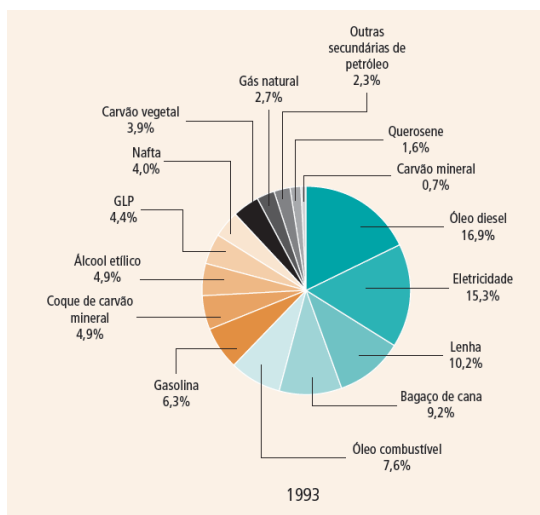


Figura 6: Participações dos principais energéticos no consumo final no Brasil em 1993.

Fonte: MME,2005.

1.1.1.4 DE 1994 À 1998

Entre 1994 e 1998 o consumo final no país passou a ter um crescimento de 18,0% no período ou uma média anual de 4,2%. As variações nas participações dos principais energéticos ocorridas nesse período foram poucas, como pode ser observado na Figura 7 abaixo. Os destaques nesse período foram os derivados do petróleo. A gasolina teve um crescimento em seu consumo, com a participação saltando de 6,5% para 8,8, enquanto o álcool apresentou uma queda em função da estagnação do PROALCOOL.

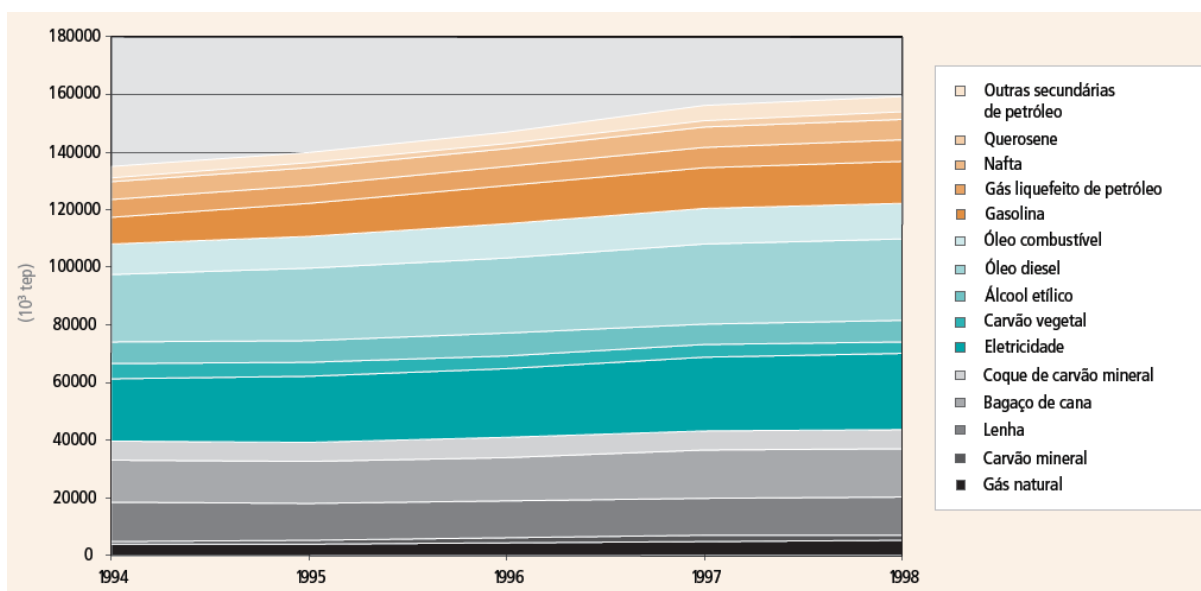


Figura 7: Evolução dos consumos finais dos principais energéticos do Brasil, no período 1994-1998.

Fonte: MME, 2005.

1.1.1.5 DE 1999 À 2005

No período entre 1999 e 2004 (os dados do Balanço Energético Nacional de 2005 tem como ano base 2004) o crescimento significativo do consumo de gás natural foi o principal destaque, tendo sua participação no consumo final aumentado de 3,3% para 6,4%. A principal causa para tal ocorrência é atribuída ao início da operação do

gasoduto Brasil-Bolívia (Gasbol), em 1999. A evolução dos principais energéticos brasileiros entre 1999 e 2004 pode ser observada na Figura 8.

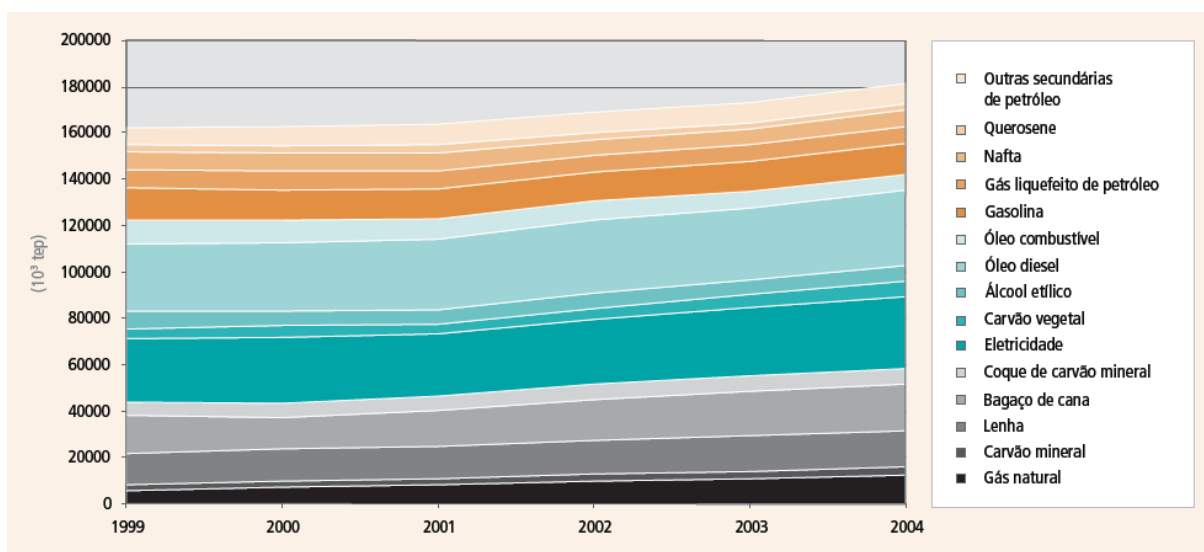


Figura 8: Evolução dos Consumos Finais dos Principais Energéticos do Brasil entre 1999 e 2004.

Fonte: MME, 2005.

1.1.2 PANORÂMA BRASILEIRO – PROJEÇÃO DO CONSUMO DE ENERGIA

Com base nos dados apresentados anteriormente, e como se pode observar na Figura 9 abaixo, cabe ressaltar uma clara tendência de diversificação da matriz energética brasileira. Em 1970 apenas duas fontes de energia, petróleo e lenha, respondiam por 78% do consumo, enquanto em 2000 três fontes correspondiam a 74% do consumo: além de petróleo e lenha, a energia hidráulica. Projeta-se para 2030 uma situação em que quatro fontes serão necessárias para satisfazer 77% do consumo: além de petróleo e energia hidráulica, cana-de-açúcar e gás natural — com redução da importância relativa da lenha.

Destaque-se ainda a reversão da tendência de redução da participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira. Em 1970 essa participação era superior a 58%, em virtude da predominância da lenha. Com a introdução de recursos

energéticos mais eficientes, a participação das fontes renováveis caiu para 53% no ano 2000 e chegou a 44,5% em 2005. Essa tendência deve se manter nos próximos anos, mas visualiza-se a possibilidade de reversão a partir de 2010, como indicado na Figura 10, que mostra a evolução do consumo de energia renovável na matriz energética brasileira.

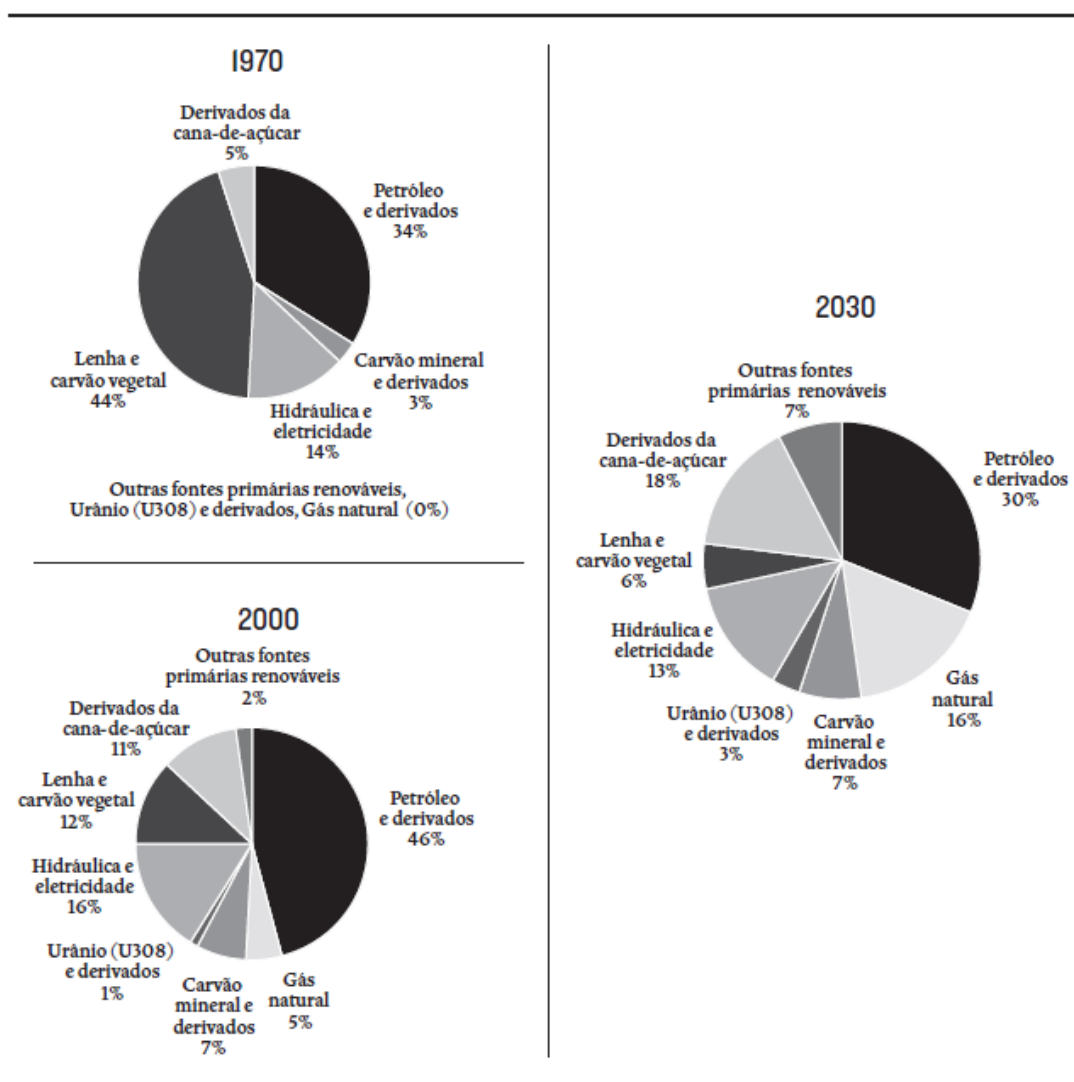


Figura 9: Evolução da estrutura da oferta de energia no Brasil entre 1970 e 2030.

Fonte: EPE.

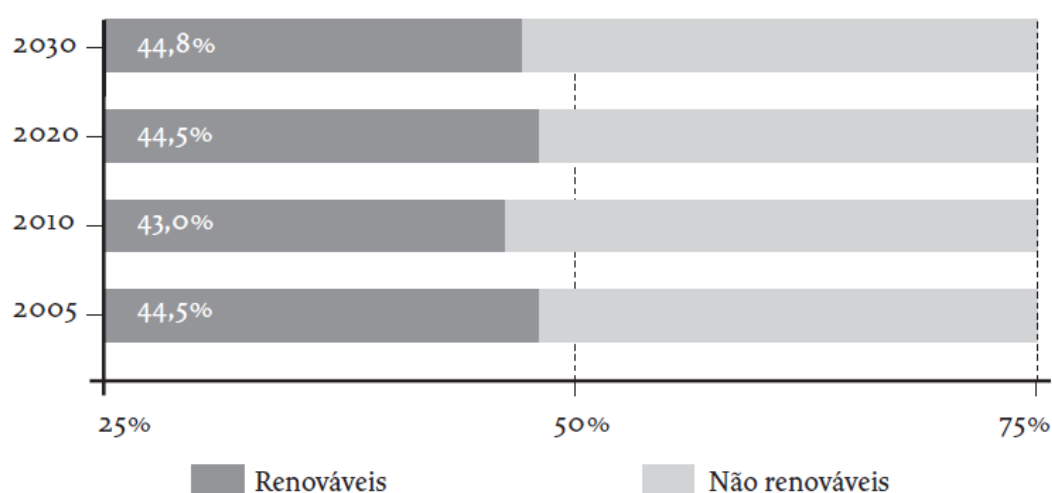


Figura 10: Evolução da participação das fontes renováveis na matriz energética Brasileira.

Fonte: EPE.

1.1.3 PANORÂMA BRASILEIRO – CONSUMO DE GÁS NATURAL

No estudo de caso do presente trabalho, a fonte de energia utilizada no processo é o gás natural, em função disso iremos explicar um pouco mais sobre o consumo desse combustível especificamente.

Partindo dos dados apresentados na sessão anterior pode-se afirmar com relação ao gás natural que seu consumo era muito reduzido ao longo da década de 1970, isso porque a produção nacional era pequena e a baixa demanda inviabilizava a comercialização.

Aumentos significativos no consumo ocorreram somente a partir da década de 1980 em função da descoberta e início da operação da Bacia de Campos, e no final da década de 1990 com o início da operação do gasoduto Bolívia – Brasil.

Com base nessas informações assume-se que haverá um aumento significativo da participação do gás natural na demanda de energia no Brasil, o que deslocará o consumo de óleo combustível e da lenha.

O setor industrial é o principal responsável pela expansão do consumo deste energético no longo prazo embora também se observem ganhos de participação nos demais setores.

O consumo energético representa mais de 70% do consumo final de gás natural, sendo que as projeções até 2030 resultam na participação da demanda de gás natural para consumo energético da ordem de 97%, em média. Na Figura 11, é apresentada a evolução da demanda energética de gás natural.

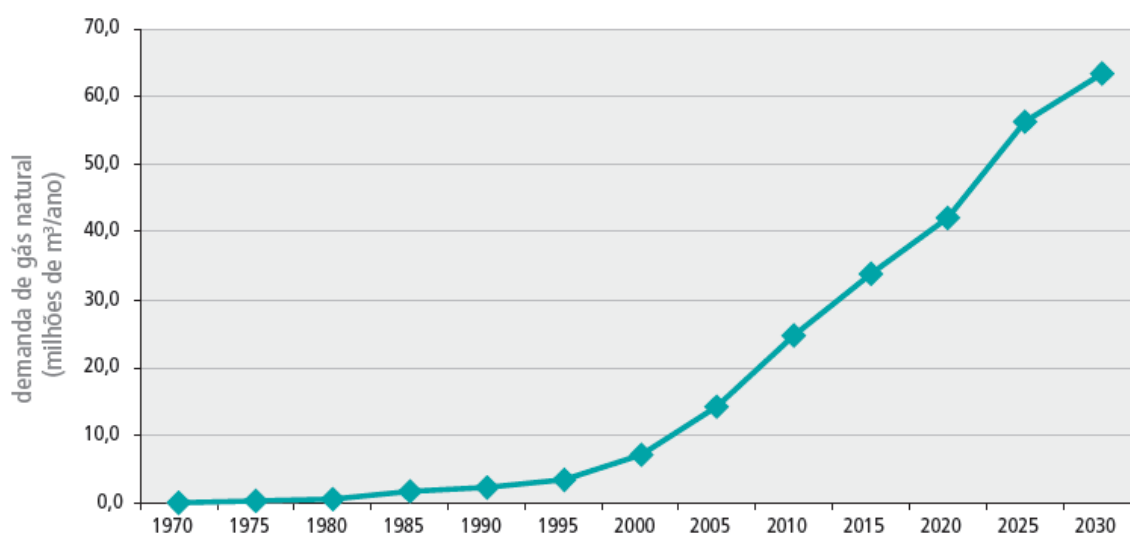


Figura 11: Evolução da demanda energética de Gás Natural no Brasil entre 1970 e 2030.

Fonte: Elaborado a partir de EPE/MME, 2005, e EPE,2006.

1.2 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA

A poluição atmosférica vem aumentando a cada ano, em função dos processos industriais que utilizam combustão. A quantidade de gases contaminantes gerados e de partículas lançadas na atmosfera torna preocupante o futuro da qualidade do ar no planeta.

Os componentes gasosos da atmosfera e seus níveis, quando o ar é considerado limpo são mostrados na Tabela 1. Problemas de poluição atmosférica estão

relacionados com o aumento nas concentrações daqueles compostos considerados prejudiciais, como por exemplo CO, NO_x, SO_x dentre outros.

Os poluentes podem se apresentar em forma de partícula sólida, aerossóis ou gases e, geralmente, são divididos em dois grupos distintos: o dos poluentes primários, emitidos diretamente por fontes identificáveis, e o dos poluentes secundários, produzidos na atmosfera em função da interação de dois ou mais poluentes primários, estando nesse grupo os óxidos de nitrogênio como principais precursores.

Tabela 1 - Constituintes Gasosos da Atmosfera

Constituinte	Composição (%, v/v)	Constituinte	Composição (ppb, v/v)	Constituinte	Composição (ppb, v/v)
N ₂	78,1	Kr	1000	NH ₃	6
O ₂	20,9	H ₂	500	SO ₂	2
Ar	0,934	N ₂ O	300	CH ₃ Cl	0,5
CO ₂	0,033	CO	100	C ₂ H ₄	0,2
Ne	0,002	Xe	90	CCl ₄	0,1
He	0,0005	O ₃	40	CCl ₃ F	0,1
CH ₄	0,0002	NO ₂ + NO	10 ^{-0,001}		

Fonte: Cónsul et al.(2004).

Nota: Dados adaptados pelo autor.

Quando comparado com o resto do mundo, o Brasil tem se destacado por apresentar índices de emissão de gases reduzidos em sua produção de energia. A razão dessa baixa taxa de emissão se deve basicamente à elevada participação de fontes renováveis na oferta energética interna, que em 2005 foi da ordem de 44,5%.

No horizonte de longo prazo, fatores como o ritmo de crescimento da economia e a estrutura da expansão do consumo de energia terão papel fundamental no volume das emissões de gás carbônico (CO₂). Mesmo levando-se em conta o aumento da participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira, o nível de emissões deverá se ampliar nos próximos 25 anos. Nas condições aqui consideradas, projetam-se emissões de cerca de 970 milhões de toneladas de CO₂ em 2030.

A evolução do perfil de consumo de energia primária implica em níveis distintos de crescimento das emissões de CO₂. Desse modo, projeta-se que em 2030 as fontes renováveis terão participação (líquida) nula nessas emissões, ao passo que os derivados de petróleo responderão pela maior parte das emissões, com participação de cerca de 50%.

O gás natural, embora apresente fatores de emissão menores que os dos demais combustíveis fósseis, teria sua participação aumentada para aproximadamente 17%, por causa do maior emprego na indústria e na geração elétrica.

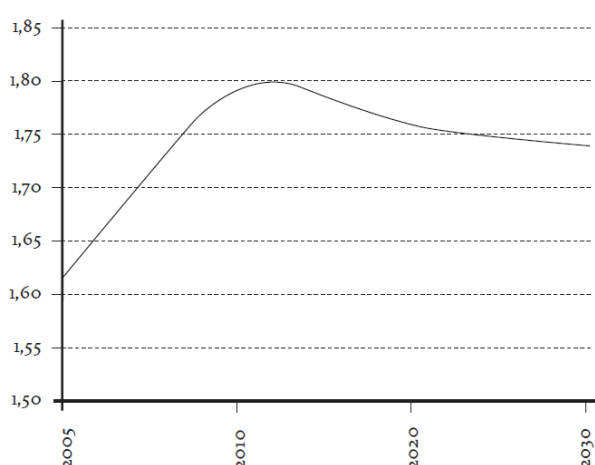


Figura 12: Evolução das emissões específicas de CO₂ no Brasil entre 2005 e 2030, em tCO₂/tep, com base na oferta interna de energia.

Fonte: EPE.

Mesmo que o índice das emissões específicas estimado para 2030 seja bastante inferior à média mundial atual, não significa que se deva minimizar a importância dessa questão no caso brasileiro.

O aumento do nível de emissões a curto prazo é por si só um sinal da necessidade da implementação de medidas e iniciativas que assegurem a reversão dessa tendência. Já que o desenvolvimento do país parece tornar irreversível o aumento dessas emissões, torna-se necessário empreender um esforço para fazer com que a médio e longo prazo esse desenvolvimento não implique tal aumento.

O cenário formulado indica que esse caminho é possível mesmo sem grandes alterações estruturais. Medidas voltadas a tornar energeticamente mais eficiente os processos industriais existentes são uma boa solução.

1.2.1 POLUIÇÃO ATMOSFÉRICA – CONTRIBUIÇÃO DO GÁS NATURAL

Como mencionado anteriormente, o combustível do processo analisado é o gás natural, que é uma mistura de hidrocarbonetos leves que, à temperatura ambiente e pressão atmosférica, permanece no estado gasoso.

Segundo o Ministério do Meio Ambiente, o gás natural pode ser considerado uma fonte de energia limpa que pode ser usada nas indústrias, substituindo outros combustíveis mais poluentes como óleos combustíveis, lenha e carvão, pois apresenta algumas vantagens ambientais se comparada a essas fontes de energia como, por exemplo:

- Baixa presença de contaminantes;
- Combustão mais limpa, que melhora a qualidade do ar, já que substitui formas de energias poluidoras como carvão, lenha e óleo combustível, contribuindo também para a redução do desmatamento;
- Menor contribuição de emissões de CO₂ por unidade de energia gerada (cerca de 20 a 23% menos do que o óleo combustível e 40 a 50% menos que os combustíveis sólidos como o carvão);
- Pequena exigência de tratamento dos gases de combustão;
- Maior facilidade de transporte e manuseio, o que contribui para a redução do tráfego de caminhões que transportam outros tipos de combustíveis;
- Não requer estocagem, eliminando os riscos do armazenamento de combustíveis;
- Maior segurança; por ser mais leve do que o ar, o gás se dissipa rapidamente pela atmosfera em caso de vazamento;
- Contribuição para a diminuição da poluição urbana quando usado em veículos automotivos, uma vez que reduz a emissão de óxido de enxofre, de fuligem e de materiais particulados, todos presentes no óleo diesel.

Porém, por se tratar de um combustível fóssil, formado há milhões de anos, é uma energia não renovável. Nesse sentido, mesmo apesar das vantagens relativas do gás natural, seu aproveitamento como combustível como qualquer outra intervenção

humana, produz impactos indesejáveis ao meio ambiente, dentre os quais se destaca as emissões atmosféricas.

Os principais poluentes atmosféricos emitidos pela combustão do gás natural são dióxido de carbono (CO_2), óxidos de nitrogênio (NO_x) e, em menor escala, monóxido de carbono e alguns hidrocarbonetos de baixo peso molecular, inclusive metano, devido à combustão incompleta.

Vale ressaltar, que o teor de nitrogênio contido no gás influenciará nas emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), mas a emissão de NO_x é decorrente tanto de mecanismos térmicos quanto da composição do combustível. Isto significa que, mesmo não contendo nitrogênio na sua composição química, a queima de gás natural pode produzir óxidos de nitrogênio (NO_x) em função da reação do nitrogênio atmosférico presente no ar de combustão.

A emissão de NO_x proveniente da combustão do gás natural será um dos objetos de estudo deste trabalho, sendo ele o fator averiguado quanto aos impactos ambientais gerados pelo processo.

1.3 CARACTERIZAÇÃO DO PROBLEMA

Tendo em vista a necessidade mundial por energia, e os problemas ambientais relacionados com a poluição atmosférica realizamos este trabalho com o propósito de promover uma alternativa de aproveitamento de uma energia que é atualmente desperdiçada, avaliando os impactos ambientais que este aproveitamento pode causar.

1.3.1 PROCESSO INDUSTRIAL ANALISADO

Analizamos um processo industrial termo-químico (Figura 13), que tem como uma de suas etapas a queima do gás natural, considerado para efeito de estudo composto basicamente pelo gás metano (CH_4). A combustão existente nesse processo produz uma mistura de gases com elevada temperatura, que apresenta uma alta disponibilidade energética na forma de energia térmica. Porém, a etapa de queima de combustível, como mencionado anteriormente, produz uma mistura de gases que apresenta alguns componentes nocivos à população e ao meio ambiente, e esses gases, apesar de saírem pelo sistema de exaustão com uma grande disponibilidade energética, devido a sua elevada temperatura, podem causar grandes problemas ambientais caso não ocorra a dispersão dos mesmos.

O processo simulado situa-se na região costeira do Brasil, sofrendo portanto impactos relacionados com as características meteorológicas regionais, que serão descritas posteriormente.

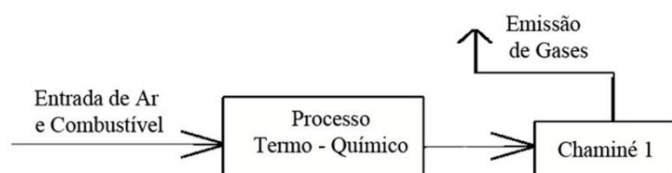


Figura 13: Processo Industrial Atual.

A proposta do trabalho é realizar uma extração mássica dos gases capaz de produzir uma potência definida, e avaliar os impactos que esse aproveitamento causará. O processo industrial proposto está ilustrado na Figura 14 abaixo.

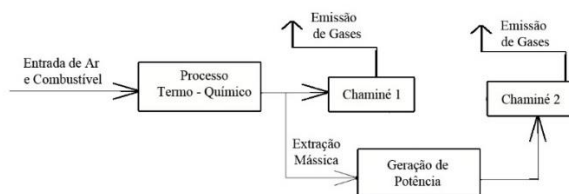


Figura 14: Processo Industrial Proposto.

1.3.1.1 DISPERSÃO DOS GASES DE EXAUSTÃO

Essa disponibilidade não é atualmente aproveitada devido à necessidade de uma boa dispersão dos componentes da mistura de gases de exaustão que são nocivos ao meio ambiente. Como a taxa de dispersão sofre influência da temperatura uma retirada de energia deve causar um aumento na deposição desses elementos.

Dentre os componentes da mistura de gases de exaustão encontram-se óxidos de nitrogênio (NO_x), que podem ser prejudiciais à saúde caso venham a atingir valores excessivos, e que como mencionado serão o indicador de impactos ambientais deste trabalho.

1.4 OBJETIVO

Assim sendo, o objetivo deste trabalho é estabelecer valores da disponibilidade energética que podem ser aproveitados para a geração de potência, analisando a dispersão dos óxidos de nitrogênio emitidos e averiguando se os padrões de legislação vigente, que garantem a saúde da população, continuarão sendo obedecidos, caso essa energia passe a ser utilizada.

2 ANÁLISE TEÓRICA

2.1 ÓXIDOS DE NITROGÊNIO (NO_x)

Óxidos de nitrogênio (NO_x) é o termo utilizado para a mistura dos: óxido nítrico (NO), óxido nitroso (N₂O) e o dióxido de nitrogênio (NO₂). Dentre os óxidos, o NO e o NO₂ são os que representam maior importância quanto à poluição ambiental, e destes mais de 95 % das emissões estão sob a forma de NO que em seguida oxidado em NO₂ na atmosfera.

As principais fontes emissoras destes óxidos são as fontes antropogênicas fixas e móveis: queima de combustível fósseis e da biomassa. Porém, há também grande produção de NO_x por fontes naturais, como atividades vulcânicas, relâmpagos, atividade microbiana do solo, oxidação da amônia e processos foto líticos ou biológicos nos oceanos.

Segundo Cónsul et al.(2004), as emissões globais de NO_x são de 10 milhões de toneladas por ano, provenientes de fontes naturais (1 milhão nos EUA) e 40 milhões de toneladas por ano, de fontes antropogênicas (6 milhões nos EUA) oriundas principalmente dos processos de combustão, tais como emissões automotivas.

O óxido nítrico (NO) é introduzido no meio ambiente principalmente em consequência da elevada temperatura na combustão. Esse gás é considerado inofensivo quando puro, mas é facilmente oxidado formando o NO₂ por meio de uma reação com o ozônio ou com radicais de peróxidos presentes na atmosfera:



O Dióxido de Nitrogênio (NO₂) é considerado o vilão dentre os óxidos de nitrogênio por ser altamente tóxico. O NO₂ reage com todas as partes do corpo expostas ao ar, pele e mucosas o que provoca lesões celulares. O sistema respiratório é o que mais

sofre, ocorrendo degenerações e inflamações que vão desde o nariz até a profundidade dos alvéolos pulmonares.

A inalação pode provocar edema pulmonar, hemorragias alveolares e insuficiência respiratória e até morte nos casos de intoxicação grave. Se a exposição for intensa, mas não fatal, bronquites, traqueítes e outras graves doenças pulmonares poderão surgir.

Além dos problemas para a saúde humana o excesso de NO_x no ambiente pode levar à formação de smog fotoquímico, que é um aerossol branco irritante aos olhos e mucosas, e das chuvas ácidas. A Tabela 2 apresenta concentrações de NO_2 e SO_2 que determinam a qualidade do ar.

Tabela 2 - Concentrações de SO_2 e de NO_2 que determinam a Qualidade Do Ar

Qualidade	SO_2 (g/m ³)	NO_2 (g/m ³)
Boa	0 – 80	0 – 100
Regular	81 – 365	101 – 320
Inadequada	366 – 800	321 – 1130
Má	801 – 1600	1131 - 2260
Péssima	>1600	>2260

Fonte: VAZ, et al. (2013)

2.1.1 FORMAÇÃO DE NO

O NO é o óxido mais formado durante o processo de combustão, e sua formação pode ocorrer por meio de três mecanismos principais: reação do nitrogênio atmosférico com o oxigênio a altas temperaturas, dando origem ao NO térmico, reação entre radicais hidrocarbônicos livres e a molécula de nitrogênio, que gera o NO *prompt* (imediatos), e pela reação do nitrogênio existente no combustível, que forma o NO combustível.

Dependendo das condições onde ocorre a combustão, pode haver predomínio de um dos mecanismos de formação mencionados, onde há temperaturas elevadas predomina o NO térmico, se há elevada concentração de nitrogênio no combustível, e a temperatura é baixa os outros tipos de NO são predominantes. Como no processo analisado durante o presente trabalho a formação do NO se dá principalmente pelo efeito da elevada temperatura, caracterizando a formação do NO térmico, esse mecanismo de formação será mais explanado a seguir.

O NO térmico é obtido a partir da reação do nitrogênio do ar atmosférico com o oxigênio dissociado pelas altas temperaturas impostas no processo de combustão. O mecanismo de formação do NO térmico envolve um conjunto de reações químicas, que foram propostas por Zeldovich (Hayhurst e Vince, 1980):



As conclusões as quais Zeldovich chegou são de que a taxa de formação de NO é muito mais lenta do que a taxa das reações de combustão e que a maior parte do NO era formado após o processo de combustão ter sido finalizado. Segundo Chigier (1981), na região de chama é possível verificar pouca formação de NO térmico, que em sua maioria é gerado na região de pós-chama.

2.1.2 FORMAÇÃO DE NO₂

De acordo com Webb e Hunter (1998), apenas uma fração dos óxidos de nitrogênio que são formados durante a queima de combustíveis fósseis é emitida na atmosfera como dióxido de nitrogênio (NO₂). Segundo Janssen et al. (1988), essa quantidade é menor que 5% do total, considerando que o restante do NO_x apresenta-se na forma de NO.

Teixeira e Lora (2004) considera que a importância dos diferentes mecanismos de formação dos NO_x depende dos seguintes parâmetros: temperatura da chama, nitrogênio presente no combustível e parâmetros da fornalha (coeficiente de excesso de ar).

O NO se transforma em NO_2 pela reação de oxidação com o ozônio atmosférico, após ter sido emitido, como ilustrado na Figura 15. A velocidade da reação e os processos de dispersão e mistura da pluma com ar atmosférico determinam a taxa de oxidação do NO. Esses fatores, por sua vez, dependem das condições meteorológicas, como velocidade do vento e radiação solar, além das concentrações dos reagentes.

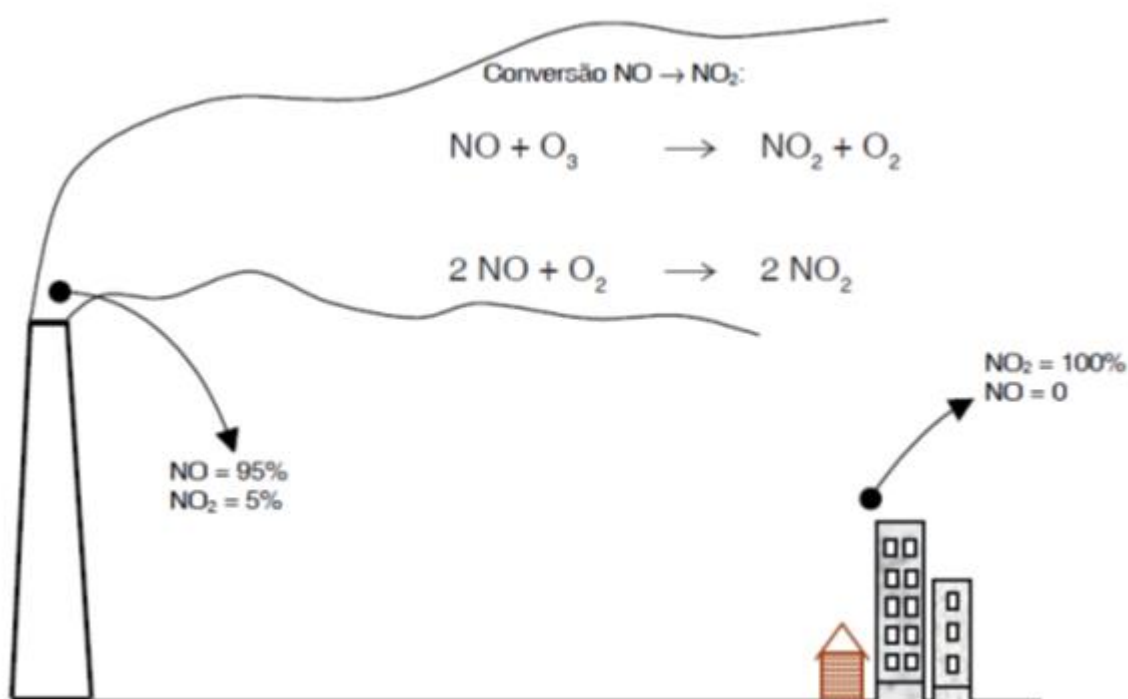


Figura 15: Conversão do NO em NO_2 no ambiente.

Fonte: GOLDEMBERG, JOSÉ (2009).

Nota: Adaptado pelo autor.

As reações químicas referentes à transformação de NO em NO_2 são:



A reação 2.7 do NO com o oxigênio molecular é muito lenta, de modo que não tem muita influência na alta concentração de NO₂ nas plumas das chaminés, porém caso haja episódios prolongados de poluição urbana essas concentrações podem ser afetadas, resultando em elevados valores.

2.2 DISPERSÃO ATMOSFÉRICA

Os poluentes depois de emitidos podem ficar restritos a regiões próximas à fonte emissora ou serem transportados à longa distância antes de alcançarem a superfície solo. Esse processo dispersão atmosférica de poluentes é extremamente complexo e sofre influência direta das condições meteorológicas e topográficas da região, portanto é imprescindível o conhecimento dos fenômenos que regem a atmosfera.

2.2.1 FATORES METEOROLÓGICOS QUE INFLUENCIAM A DISPERSÃO

Dentre diversas condições meteorológicas que influenciam a dispersão atmosférica, as mais importantes e que podem prognosticar níveis críticos de poluição do ar são: altura da Camada Limite Planetária, intensidade e direção do vento, inversão térmica e estabilidade atmosférica. Essas condições são descritas a seguir.

2.2.1.1 CAMADA LIMITE PLANETÁRIA

O conhecimento da Camada Limite Planetária (CLP) é de fundamental importância para o entendimento dos processos na baixa troposfera e mais especificamente, para os fenômenos ligados à dispersão de poluentes atmosféricos, pois é nesta região

onde localizam-se a maior parte das fontes emissoras de gases. (SANTIAGO, 2009)
A figura 16 mostra a representação da troposfera e da CLP.

Podemos definir a Camada Limite Planetária (CLP) como a região da troposfera que é diretamente influenciada pela presença da superfície da Terra e responde as forçantes superficiais em uma escala de tempo inferior a uma hora. Tais forçantes incluem forças de atrito, evaporação e transpiração, transferência de calor, emissão de poluentes e características do terreno (STULL, 1988). A altura da CLP não é constante, variando com o tempo e a localização geográfica num intervalo de centenas de metros a poucos quilômetros.



Figura 16 :Representação da CLP e da atmosfera livre na Troposfera
Fonte: Adaptado de Stull (1988)

Na CLP o transporte de espécies como poluentes é feito na horizontal pelo vento médio (advecção) e na vertical pela turbulência, que segundo Stull (1988) pode ser visualizada como uma superposição de vórtices irregulares com diferentes escalas espaciais e temporais. A maior parte da turbulência é formada por forçantes superficiais como o aquecimento solar (turbulência térmica) e o cisalhamento provocado pelo vento (turbulência mecânica) (Nedel, 2003, p. 27).

2.2.1.1.1 ESTRUTURA DA CAMADA LIMITE PLANETÁRIA

A CLP é dividida de acordo com os processos físicos e de mistura que nela ocorrem com a seguinte classificação: Camada Limite Superficial (CLS), Camada Limite

Convectiva ou Camada de Mistura (CLC), Camada Residual (CR), Camada Limite Estável (CLE), de acordo com a figura 17.

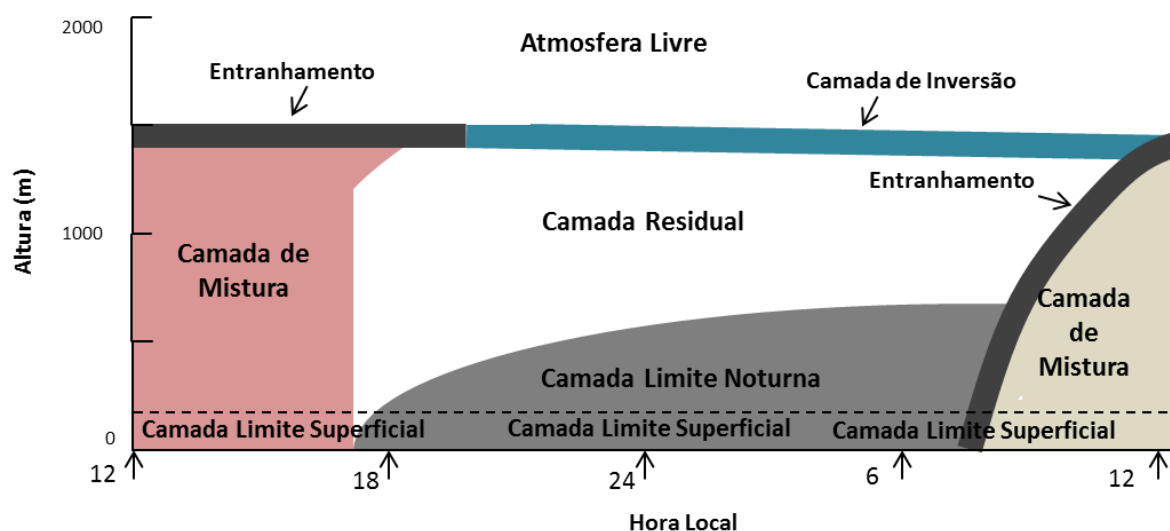


Figura 17: Estrutura da Camada Limite Planetária

Fonte: Adaptado de Stull (1988)

A Camada Limite Superficial (CLS) é a mais próxima ao solo, com aproximadamente 10% da altura da CLP e apresenta variação de menos de 10% da magnitude total dos fluxos turbulentos e das tensões presentes nessa região. A proximidade com o solo confere a essa região uma forte turbulência, não importando se a camada é diurna ou noturna. Na CLS ventos horizontais são da ordem de 2 a 10 m/s e os ventos verticais, bem mais fracos, da ordem de cm/s.

A Camada Limite Convectiva ou de Mistura (CLC) é a parte da atmosfera mais afetada pelo aquecimento solar, sendo caracterizada por uma mistura vertical provocada por movimentos convectivos organizados.

A CLC desenvolve-se durante o dia, iniciando aproximadamente trinta minutos após o nascer do sol e atingindo sua maior espessura à tarde. É uma camada instável, alimentada pelos fluxos turbulentos de calor da superfície para a atmosfera. Assim, tal turbulência, gerada pela convecção térmica, tende a misturar calor, umidade e quantidade de movimento.

Segundo Côrrea (1997) os forçantes convectivos que geram a convecção térmica na CLC incluem a transferência de calor a partir da superfície da terra aquecida para a

atmosfera, que gera massas de ar quente em suspensão a partir do solo (termas), e o resfriamento radiativo do topo das camadas de nuvens, gerando as termas de ar frio que descem do topo das nuvens em direção ao solo.

A intensidade de mistura convectiva na CLC influencia diretamente o comportamento da dispersão de poluentes atmosféricos. Quando o aquecimento da camada de mistura convectiva é muito intenso há a ocorrência de grandes turbilhões, transportando a pluma rapidamente para o solo.

Entre a CLC e a atmosfera livre encontra-se a zona de entranhamento, região de transição onde a turbulência deixa de ser significativa.

Quando a superfície da terra deixa de ser aquecida, aproximadamente meia hora antes do por do sol, ocorre a diminuição da turbulência convectiva, originando a Camada Residual (CR). Nesta camada os processos de mistura são geralmente muito fracos e a turbulência apresenta magnitude praticamente igual em todas as direções, como consequência as plumas dispersam-se também em todas as direções. É possível observar um perfil em cone na saída das chaminés.

No período da noite o fluxo turbulento de calor torna-se negativo, pois a temperatura da atmosfera vai se tornando mais alta do que a do solo, assim, os forçantes básicos que mantem a CLC desaparecem tornando a atmosfera estável. Essa Camada Limite Estável (CLE) caracteriza-se por ter ar estaticamente estável com turbulência apenas esporádica.

A estrutura da CLE depende basicamente do processo dominante no resfriamento da atmosfera que pode ser radiativo e/ou turbulento. Em condições de céu claro, ventos fracos e baixa umidade há a predominância de resfriamento radiativo formando uma camada de inversão acentuada e de baixa turbulência. Em outra situação, principalmente na presença de cisalhamento dos ventos, o resfriamento turbulento é predominante diminuindo a camada de inversão.

Quando o processo radiativo de resfriamento é dominante a dispersão de poluentes tem relação direta com a altura das chaminés. Para alturas elevadas de emissão, chaminés da ordem de 150m ou mais, os poluentes podem percorrer dezenas de quilômetros praticamente apenas com dispersão horizontal, porém na situação de

resfriamento turbulento a presença de turbilhões gera uma mistura continua aumentando consideravelmente a dispersão vertical.

2.2.1.2 VENTOS

A direção e a velocidade dos ventos na região de emissão influenciam diretamente no processo de transporte e dispersão dos poluentes. Em situações de pouco vento ocorre a estagnação do ar causando um aumento da concentração de poluentes nas regiões próximas à emissão.

Dentre os parâmetros que influenciam a concentração de poluentes originados de uma fonte pontual, como uma chaminé, a intensidade dos ventos é o mais determinante. Pequenos erros na estimativa da direção e intensidade dos ventos pode ocasionar grandes erros nas estimativas de concentrações. Segundo Boubel et al. (1994) apud Moraes, (2001), uma mudança de 5° graus na direção da velocidade do vento pode causar uma redução de até 90 % na concentração medida.

2.2.1.3 INVERSÃO TÉRMICA

Inversão térmica refere-se à condição atmosférica quando ocorre o aumento da temperatura do ar com a altura. As inversões térmicas geram grande estabilidade, pois o movimento vertical é inibido pela presença das camadas mais quentes de ar nos níveis mais altos.

A ocorrência da inversão térmica tende a agravar os níveis de concentração de poluentes atmosféricos, principalmente próximo às fontes emissoras, ao dificultar a dispersão atmosférica. A descrição das situações de inversão térmica e o comportamento das plumas nessas situações são descritos no tópico sobre estabilidade atmosférica.

2.2.1.4 ESTABILIDADE ATMOSFÉRICA

A estabilidade da atmosfera pode ser definida como sendo a sua capacidade de resistir ou intensificar os movimentos verticais. Quando ela resiste aos movimentos verticais é chamada de atmosfera estável, quando intensifica os movimentos verticais é dita atmosfera instável ou convectiva, e quando é indiferente a qualquer tipo de movimento vertical é chamada atmosfera neutra (Moraes, 2004).

Condições de atmosfera neutra ocorrem normalmente durante transições entre dia e noite e são caracterizadas por um perfil vertical de temperaturas praticamente constante. Nesses casos, devido à ausência de convecção térmica, a turbulência pode ser considerada homogênea, com turbilhões do mesmo tamanho e atuando em todas as direções. Assim, a pluma assume uma forma cônica. (Caso B da figura 18.)

Condições instáveis ocorrem durante o dia devido ao aquecimento da superfície do solo pela incidência de radiação solar. Esse aquecimento gera um gradiente positivo de temperatura ocasionando uma forte mistura vertical. Em atmosferas convectivas o aspecto da pluma assume uma forma serpenteante (caso A da figura 18).

Condições estáveis são caracterizadas por um perfil superadiabático (aumento da temperatura com a altura), que ocorre normalmente no período noturno. Quando a parcela de ar, ao elevar-se na atmosfera, encontrar ar circundante mais quente sua tendência é descer, assim, o movimento vertical é inibido. Nesse caso há a predominância da turbulência mecânica sobre a convectiva e a pluma assume o aspecto tubular, (caso C da figura 18).

Existem também as condições mistas como a fumigação (caso E da figura 18), na qual ocorre uma inversão do perfil de temperaturas a uma dada altura impossibilitando a dispersão para altitudes mais elevadas. Como na parte inferior o perfil é instável, os poluentes são dispersados em direção ao solo pelas correntes descendentes fazendo com que os níveis de concentração de poluentes nessas regiões sejam elevados.

Outra situação mista é chamada de *trapping*, onde a parte inferior da atmosfera encontra-se em estado neutro, mas, na altura da pluma, há a ocorrência de uma camada de inversão. Nesse caso, como na fumigação, a dispersão fica aprisionada e dispersa em direção ao solo em formato cônico (caso F da figura 18). O caso inverso (caso D da figura 18) é chamado de anti-fumegante, onde uma camada de inversão ocorre abaixo da linha e chaminé e impede que os poluentes atinjam o solo (Moraes, 2004).

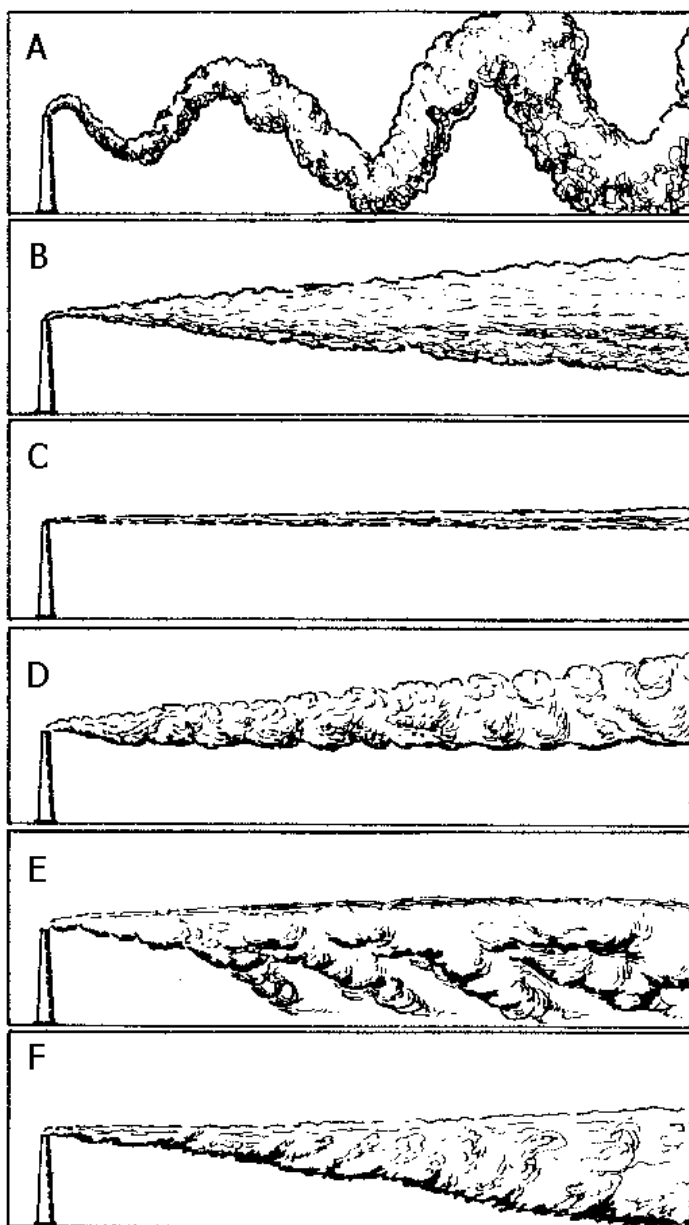


Figura 18: Influência da estabilidade atmosférica na forma da pluma.
Fonte: Moraes, 2004

2.2.2 MODELOS DE DISPERSÃO

A utilização dos modelos de dispersão torna-se cada vez mais importante, pois estes, além de interpretar os dados já existentes e analisar em tempo real a qualidade do ar, tem a capacidade de prever impactos futuros devido a qualquer mudança de cenário, seja de emissão, meteorológico ou topográfico.

Segundo Ferreira (2005), os modelos de transporte e dispersão de poluentes devem ser capazes de simular em detalhes os efeitos da turbulência para obter estimativas confiáveis sobre a distribuição da concentração dos poluentes no espaço.

Tais modelos representam uma descrição matemática simplificada dos processos de transporte e difusão turbulenta dos poluentes na atmosfera. Estes modelos tem como base a solução das equações fundamentais de transporte que não apresentam solução analítica, de forma que são necessários métodos numéricos aplicados às condições iniciais e de contorno apropriadas para a obtenção da sua solução (Nedel, 2003).

Os modelos variam em grau de complexidade e podem ser classificados pela concepção matemática em duas principais classes, os eulerianos e lagrangeanos. Os modelos eulerianos utilizam soluções da equação difusão-advecção em um sistema de referência fixo em relação à terra (Soares, 2012).

Na metodologia lagrangeana, formula-se um modelo de trajetórias para o movimento das partículas do fluido. O elemento ou partícula de um fluido é um pequeno volume de controle que viaja com a velocidade local do meio fluido, de modo que a solução do escoamento turbulento que transporta estas partículas deve ser conhecida. Para isso, é necessário conhecer a densidade de probabilidade da distribuição de concentração do poluente (Moraes, 2004).

Ainda existem os modelos gaussianos, que podem ser considerados como uma subclasse dos dois anteriores (Longhetto, 1980 apud Moraes, 2001).

2.2.2.1 MODELO EULERIANO

Na modelagem Euleriana a dispersão é estudada a partir de uma equação diferencial parcial do tipo difusão-advecção, descrita em um sistema referencial fixo em relação ao tempo e ao espaço (Vicentini, 2011).

Essa abordagem fornece 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. A equação convecção-difusão, apresentada a seguir, é a equação utilizada nesta aproximação, dada por:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u_i \frac{\partial c}{\partial x_i} = \frac{\partial (\overline{u'_i c'_i})}{\partial x_i} + S \quad (2.8)$$

Devido à predominância da turbulência no fenômeno de dispersão, a difusão molecular pode ser desprezada na equação 2.8, que pode ser solucionada empregando-se métodos numéricos do tipo volumes finitos, diferenças finitas ou elementos finitos, Maliska (2012).

2.2.2.2 MODELO LAGRANGEANO

O modelo lagrangeano é uma alternativa para obter-se as concentrações médias sem a necessidade de resolução da equação 2.8. Nesse modelo utiliza-se um referencial móvel, que se desloca com a pluma de poluentes. O fenômeno é descrito a partir de uma formulação integral, em que é necessário conhecer a densidade de probabilidade da distribuição de concentração do poluente (Vicentini, 2011).

A equação Lagrangeana fundamental para a dispersão atmosférica de uma única espécie de poluente é dada por:

$$C(x, t) = \int_0^t \int P(x, t | x' t') S(x', t') dx' dt' \quad (2.9)$$

Onde $P(x, t | x' t')$ é a função densidade de probabilidade (fdp) das partículas, que representa a probabilidade de uma partícula de fluido que estava em x' no tempo t' alcançar x no tempo t .

Segundo Carvalho (1999) apud Moraes, (2001) a equação 2.9 representa uma descrição rigorosa dos processos de transporte e de difusão expressa em uma notação probabilística, onde o parâmetro chave é a função densidade de probabilidade (fdp). Para determinar a fdp é necessário liberar um número de partículas suficientemente grande, seguir suas trajetórias e calcular quantas delas alcançam a x no tempo t . Portanto, se trajetórias reais das parcelas de ar podem ser obtidas, o cálculo simples da densidade dos pontos de trajetórias fornece uma estimativa da concentração.

2.2.2.3 MODELO DE PLUMA GAUSSIANO

Um tipo de modelo vastamente utilizado é o modelo gaussiano de simulação da dispersão atmosférica de poluentes. Esse modelo pode ser utilizado com ambos os métodos de descrição do movimento, Euleriano ou Lagrangeano.

Devido à sua simples concepção e sua fácil implementação numérica, os modelos de pluma Gaussiana são largamente utilizados na predição de concentrações de contaminantes na camada limite atmosférica (CLA), principalmente no cálculo das máximas concentrações ao nível do solo (Arya, 1999 apud Vicentini, 2011).

Os modelos gaussianos de dispersão buscam simular o comportamento das plumas de poluentes emitidas a partir de fontes ao nível e superiores ao nível do solo. De acordo com Seinfeld (2006) apud Soares (2012), em condições ideais, a média da concentração de constituintes emitidos de uma fonte pontual possui uma distribuição gaussiana. Esta afirmação, apesar de restrita ao caso de turbulência homogênea e estacionária, serve como base para as diversas fórmulas de difusão atmosférica.

O modelo de Pluma Gaussiana é normalmente aplicado quando se quer estimar as distribuições de concentrações a partir de determinada emissão industrial, estabelecendo-se condições de contorno para a movimentação do ar em torno dessa emissão. Esse modelo considera que a dispersão de uma pluma lançada na atmosfera pontualmente se dá de tal modo que a concentração dos poluentes na pluma, em relação à posição fixa da fonte, exhibe um comportamento Gaussiano. A Figura 19 representa esquematicamente esse comportamento.

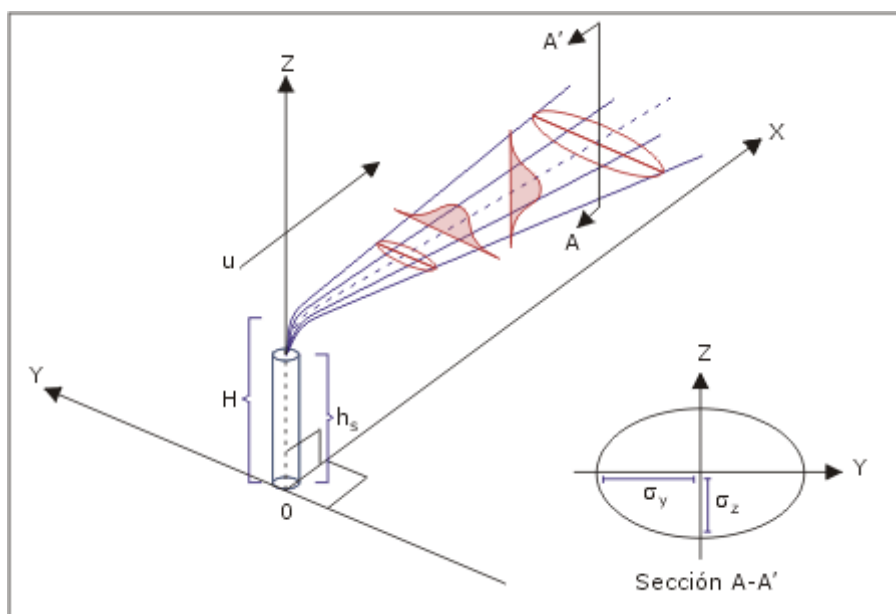


Figura 19 - Sistema de Coordenadas demonstrativo para uma Pluma Gaussiana

Fonte: Adaptado de Turner (1970)

O modelo gaussiano é baseado em uma fórmula simples que descreve um campo de concentrações tridimensional gerado por uma fonte pontual elevada sob condições meteorológicas constantes. As condições de emissão também são consideradas como sendo constantes neste tipo de modelo, que pode ser derivado da equação de difusão-advecção em situações idealizadas (Degrazia 1996 apud Moraes, 2001). As concentrações são calculadas a partir da seguinte equação:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \cdot \left\{ \exp \left[-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2} \right] + \exp \left[-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2} \right] \right\} \quad (2.10)$$

Admite-se que existe total reflexão da pluma quando toca o terreno, isto é, não há deposição nem reação química com o terreno. O último termo traduz essa reflexão, ilustrada pela figura 20. A equação também pressupõe que na direção do vento a

componente de transporte é muito superior à de difusão e, portanto, esta é desprezível.

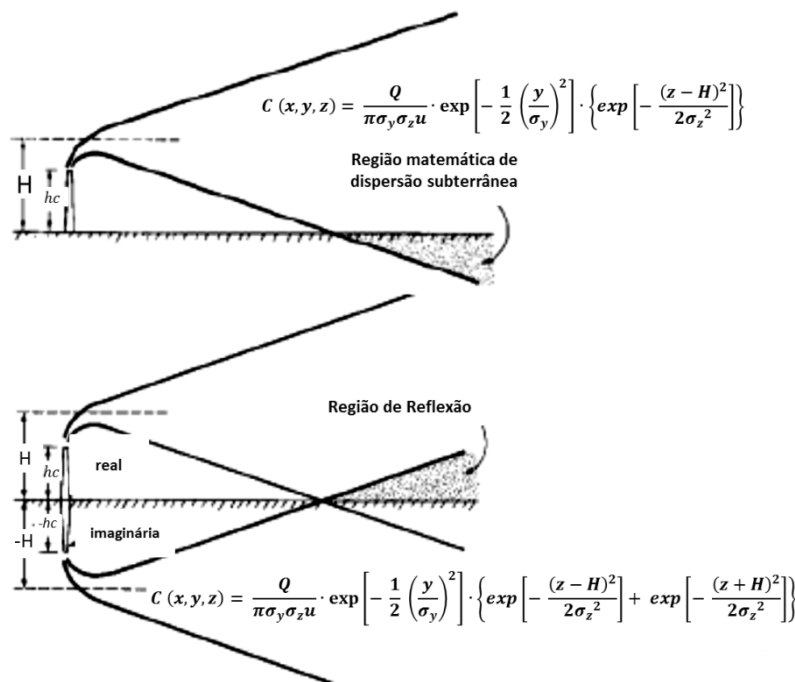


Figura 20: Região de reflexão no modelo gaussiano
Fonte: Adaptado de Cooper (2002)

Para concentrações ao nível do solo ($z = 0$), que são a equação transforma-se em:

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right] \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (2.11)$$

Essa equação é largamente utilizada nos problemas práticos, onde se pretende conhecer as concentrações a que os cidadãos estão expostos.

Se o interesse é determinar a concentração ao longo da direção do vento ($y = 0$) e ao nível do solo ($z = 0$), tem-se:

$$C(x, 0, 0) = \frac{Q}{\pi \sigma_y \sigma_z u} \cdot \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{H}{\sigma_z} \right)^2 \right] \quad (2.12)$$

O modelo AERMOD, utilizado neste estudo, é caracterizado como Euleriano gaussiano.

2.2.2.3.1 COEFICIENTES DE DISPERSÃO

Especificar os coeficientes de dispersão é uma das etapas mais importantes na modelagem de uma pluma gaussiana. Para Hanna et al. (1982) esses coeficientes são função da distância percorrida a partir da fonte emissora e da estabilidade atmosférica. Essa relação é apresentada na figura 21.

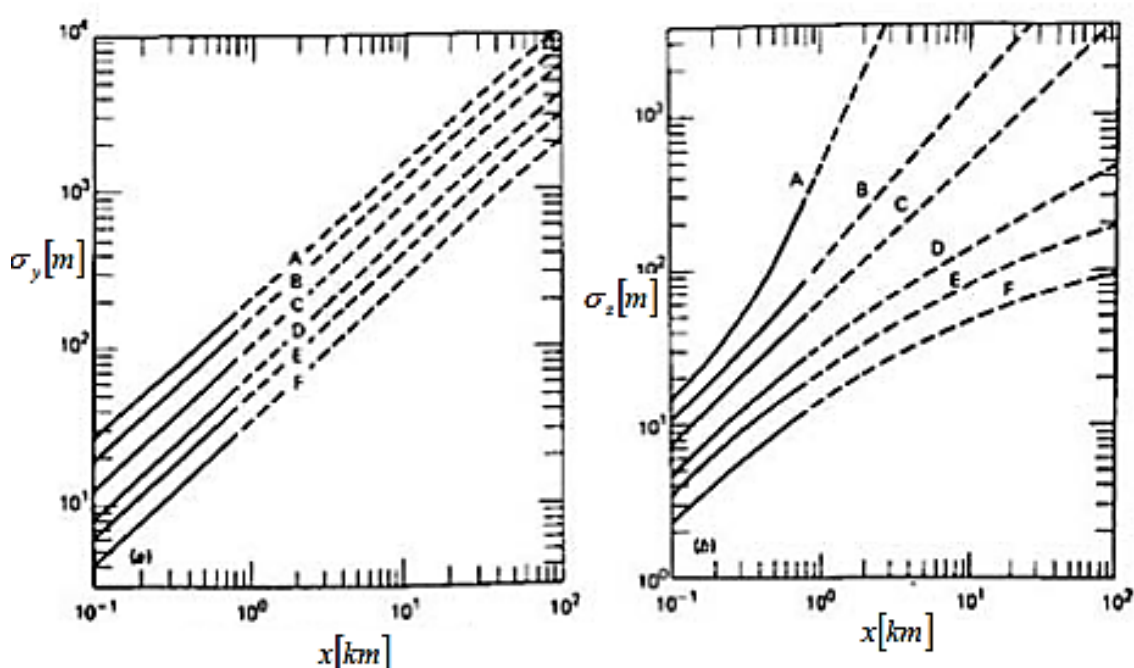


Figura 21: Curvas de variação de σ_y e σ_z com a distância segundo as classes de estabilidade de Pasquill.

Fonte: Adaptado de Hanna et al (1982)

Portanto, para uma estimativa dos coeficientes de dispersão a classe de estabilidade deve ser determinada. O esquema mais utilizado para a determinação da classe de estabilidade foi desenvolvido por Pasquill (1961) apud Hanna et al. (1982), e é apresentado na tabela 3.

Tabela 3 - Classes de estabilidade segundo Pasquill

Velocidade do Vento a 10 m do solo (m/s)	Radiação Solar (I) (W/m ²)			Cobertura Noturna de Nuvens (cn)	
	I ≥ 700	350 ≤ I ≤ 700	I < 350	cn ≥ 4/8	cn ≤ 3/8
< 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
Onde:	A: extremamente instável		D: neutra		
	B: moderadamente instável		E: fracamente estável		
	C: fracamente instável		F: moderadamente estável		

Fonte: Adaptado de Hanna et al (1982)

A partir de análises teóricas e experimentais, Briggs determinou uma série de equações baseadas nas classes de estabilidade de Pasquill para especificar os valores de σ_θ e σ_e , que são mostrados na tabela 4 (Hanna et al, 1982).

Tabela 4 - Formulação de Briggs para σ_y e σ_z segundo as classes de estabilidade de Pasquill

Classe de Pasquill	σ_y, m	σ_z, m
Condições Rurais		
A	$0.22x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.20x$
B	$0.16x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.12x$
C	$0.11x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.08x(1 + 0.0002x)^{-1/2}$
D	$0.08x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.06x(1 + 0.0015x)^{-1/2}$
E	$0.06x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.03x(1 + 0.0003x)^{-1}$
F	$0.04x(1 + 0.0001x)^{-1/2}$	$0.016x(1 + 0.0003x)^{-1}$
Condições Urbanas		
A-B	$0.32x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.24x(1 + 0.001x)^{1/2}$
C	$0.22x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.20x$
D	$0.16x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.14x(1 + 0.0003x)^{-1/2}$
E-F	$0.11x(1 + 0.0004x)^{-1/2}$	$0.08x(1 + 0.00015x)^{-1/2}$

Fonte: Hanna et al (1982)

O software utilizado, AERMOD, será descrito no tópico 2.3, porém, a explicação do método empregado para especificação dos coeficientes de dispersão é agora apresentada.

O AERMOD considera que σ_y e σ_z são uma combinação da dispersão causada pela turbulência presente no ambiente (σ_{ya} e σ_{za} , horizontal e vertical, respectivamente) e a dispersão induzida pela flutuabilidade da pluma (σ_b). Assim os coeficientes de dispersão são calculados seguindo as equações (EPA, 2004a):

$$\sigma_y^2 = \sigma_{ya}^2 + \sigma_b^2 \quad (2.13a)$$

$$\sigma_z^2 = \sigma_{za}^2 + \sigma_b^2 \quad (2.13b)$$

A determinação de σ_{ya} , σ_{za} e σ_b é feita diretamente pelo programa, no pré-processador AERMET, a partir dos dados fornecidos. O pré-processador será detalhado no tópico 2.3.1.

2.2.2.3.2 ALTURA EFETIVA

A altura efetiva, de uma emissão raramente corresponde à altura física da chaminé. Além da quantidade de movimento na emissão dos gases, a maioria das plumas emitidas possui uma temperatura superior a do ambiente o que resulta em uma força de empuxo térmico que tende a elevar a pluma.

Essa altura efetiva, H , é um importante parâmetro para a modelagem da dispersão da pluma pelo modelo gaussiano. Como mostrado na figura 22, $H = h_s + \Delta h_c$, sendo h_s a altura física da chaminé e Δh_c a elevação da pluma.

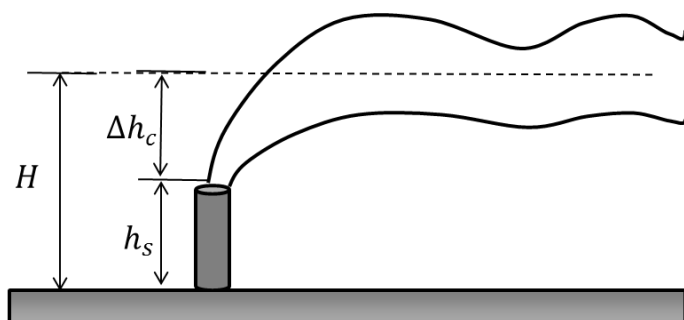


Figura 22 - Altura efetiva de emissão

Canelas (1983) cita que um dos modelos historicamente usado para calcular a elevação da pluma é o da equação 2.14, conhecida como equação de Holland.

$$\Delta h_c = \frac{v_c d}{u_s} \left[1,5 + \left(2,68 \cdot 10^{-3} \cdot P_a \cdot \frac{(T_c - T_{amb})}{T_c} \right) \right] \quad (2.14)$$

Onde, $2,68 \cdot 10^{-3}$ é uma constante de unidade ($mbar^{-1}m^{-1}$).

A equação de Holland foi muito utilizada historicamente, porém, estudos mostraram que ela subestima o valor da elevação da pluma. Atualmente, as equações de Briggs estão sendo utilizadas para se estimar a elevação da pluma.

Kawano (2003) cita que a elevação da pluma segundo Briggs é determinada para dois grupos de classes de estabilidade (instáveis/neutras e estáveis). Para cada grupo de estabilidade é necessário determinar se a elevação da pluma é dominada pela quantidade de movimento ou pelo empuxo térmico.

Para determinar qual efeito é dominante na elevação da pluma inicialmente deve-se determinar o fluxo de empuxo e o fluxo de quantidade de movimento, conforme as equações 2.15a e 2.15b.

$$F_b = g v_c d^2 \frac{(T_c - T_{amb})}{4T_c} \quad (2.15a)$$

$$F_m = v_c^2 d^2 \frac{T_{amb}}{4T_c} \quad (2.15b)$$

Conhecendo o efeito predominante e a classe de estabilidade da atmosfera é possível estimar a elevação da pluma a partir das equações de Briggs, apresentadas na Tabela 5.

TABELA 5 – Equações de Briggs para elevação da pluma

	Instável e neutra	Estável
Empuxo Térmico	$\Delta h_c = \frac{1,6 F_b^{1/3} (3,5 x^*)^{2/3}}{u_s}$ $\begin{cases} F_b \geq 55 (m^4/s^3), x^* = 34 F_b^{2/5} \\ F_b < 55 (m^4/s^3), x^* = 14 F_b^{5/8} \end{cases}$	$\Delta h_c = 2,6 \left(\frac{F_b}{u_s s'} \right)^{1/3}$
Quantidade de Movimento	$\Delta h_c = \frac{3 d v_c}{u_s}$	$\Delta h_c = 1,5 \left(\frac{F_m}{u_s \sqrt{s'}} \right)^{1/3}$

O programa AERMOD, utilizado nesse estudo, será descrito no tópico 2.3 porém, é importante mostrar que ele realiza a determinação da elevação da pluma através da superposição dos efeitos de quantidade de movimento e empuxo térmico. (EPA 2004a). Para a CLC a elevação da pluma é calculada pelo AERMOD com a equação 2.16:

$$\Delta h_c = \left(\frac{3 F_m x}{\beta_1^2 u_p^2} + \frac{3}{2 \beta_1^2} \cdot \frac{F_b x^2}{u_p^3} \right)^{1/3} \quad (2.16)$$

Onde, β_1 (=0,6) é um parâmetro de arrastamento e u_p é a velocidade do vento na altura real de lançamento.

Para a CLS o programa utiliza a equação 2.17:

$$\Delta h_c = 2,66 \left(\frac{F_b}{N^2 u_p} \right)^{1/3} \left[\frac{N' F_m}{F_b} \sin \left(\frac{N' x}{u_p} \right) + 1 - \cos \left(\frac{N' x}{u_p} \right) \right]^{1/3} \quad (2.17)$$

Onde, $N' = 0,7N$ com N sendo a frequência de Brunt-Vaisala.

Pelas equações 2.16 e 2.17 fica clara a dependência da temperatura e da velocidade de lançamento para a dispersão dos gases. Portanto, esses são parâmetros de interesse quando se avalia a quantidade de energia que pode ser retirada dos gases

antes do lançamento, para evitar um aumento da concentração de poluentes acima dos níveis críticos.

2.3 DESCRIÇÃO DO AERMOD

O AERMOD é um modelo de pluma de estado estacionário. Esse modelo, na camada limite estável (CLE), assume a distribuição da concentração como Gaussiana na vertical e na horizontal. Na camada limite convectiva (CLC), a distribuição horizontal também é assumida como sendo Gaussiana, mas a distribuição vertical é descrita com uma função densidade de probabilidade bi-Gaussiana (EPA 2004a).

Ainda segundo a EPA (2004a), o AERMOD, utilizando uma abordagem relativamente simples, incorpora conceitos atuais sobre fluxo e dispersão em terrenos complexos, sendo, quando necessário, a pluma modelada como impactando e/ou sendo impelida a contornar o terreno.

O programa também consegue caracterizar a Camada Limite Planetária (CLP) tanto na camada superficial quanto na região convectiva, sendo que para isso constrói perfis verticais de variáveis meteorológicas necessárias com base em medições e extrapolações através de definições de semelhança. Perfis verticais de velocidade do vento, direção do vento, turbulência, temperatura e gradiente de temperatura são estimados usando todas as observações meteorológicas disponíveis.

O AERMOD requer, como dado de entrada, a medição da velocidade e da direção do vento (medido entre $7z_0$ e 100m – onde z_0 é a rugosidade superficial), medição da temperatura ambiente e característica superficiais, como rugosidade do solo.

A estrutura utilizada conta com um programa principal de processamento (AERMOD) e dois pré-processadores (AERMET e AERMAP). A figura 23 expõe esquematicamente essa estrutura.

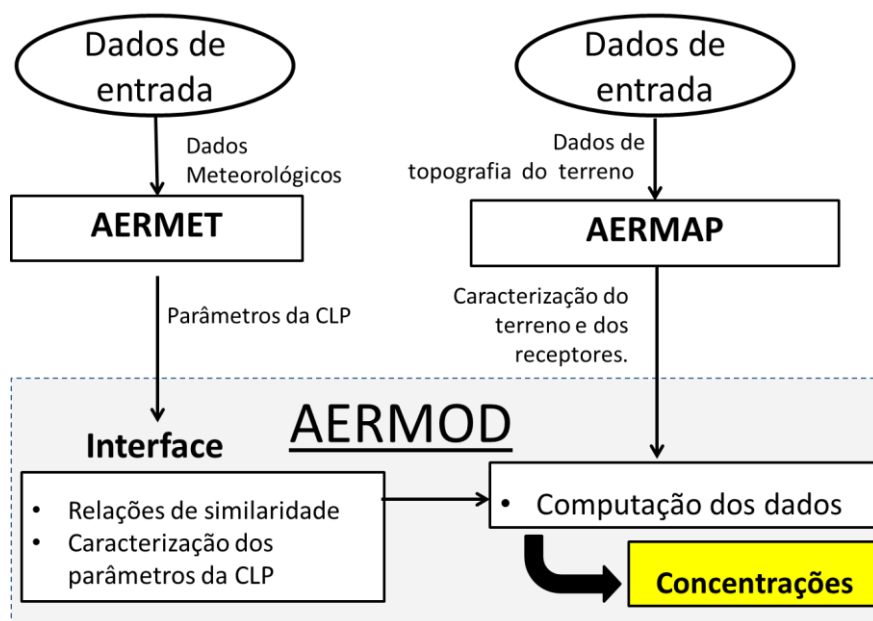


Figura 23: Estrutura do software AERMOD

Fonte : Adaptado de EPA (2004a)

2.3.1 AERMET

O AERMET é um pré-processador capaz de processar e organizar dados meteorológicos provenientes de estações meteorológicas e transformá-los em um formato adequado a ser utilizado pelo AERMOD (EPA, 2004a). O programa gera dois arquivos: um arquivo de dados de superfície e outro de dados de perfis verticais

Como princípio básico o AERMET utiliza dados meteorológicos, representativos do domínio estudado, para estimar perfis verticais de vento, turbulência e temperatura (EPA, 2004b).

O pré-processamento realizado pelo AERMET pode ser separado em três etapas: na primeira ocorre a extração e o processamento dos dados fornecidos pelo usuário; na segunda etapa todos os dados disponíveis para períodos de vinte e quatro horas são agrupados em um único arquivo; na última o programa lê o arquivo gerado na etapa

anterior e estima os parâmetros da camada limite a serem utilizados pelo AERMOD. (EPA, 2004b).

Para realizar as etapas descritas o AERMET necessita do fornecimento de informações meteorológicas. As informações mínimas necessárias são:

1. Dados meteorológicos de superfície (observações horárias)

- a) Velocidade do vento;
- b) Direção do vento;
- c) Temperatura ambiente ou de bulbo seco;
- d) Cobertura de nuvens ou cobertura total do céu;
- e) Pressão na superfície (opcional);
- f) Umidade relativa (opcional);
- g) Taxas de precipitação (opcional).

2. Dados de altitude (ar superior – dois perfis diários):

- a) Velocidade do vento;
- b) Coeficiente de turbulência vertical;
- c) Temperatura;
- d) Desvio padrão da direção do vento.

Segundo a EPA (2004b), o AERMET pode processar os seguintes formatos: CD144 (*Card Deck 144 Format*), SCRAM (*Support Center for Regulatory Models*) e SAMSON (*Solar and Meteorological Surface Observation Network*).

2.3.2 AERMAP

O pré-processador AERMAP é utilizado para processar dados do terreno e de localização das fontes emissoras e dos receptores, determinando a elevação base de cada um desses elementos. Ele também procura pela altura do terreno e a localidade que possui maior influência na dispersão para cada receptor individualmente. Essa altura é chamada de escala de altura de colina (*hill height scale*) (EPA, 2004c).

Para realizar o pré-processamento é necessário fornecer ao AERMAP dados de localização das fontes emissoras e receptoras e um arquivo de terreno, no formato DEM (*Digital Elevation Model*). O arquivo de saída deste pré-processador contém as informações geográficas das fontes e pontos receptores com a altura de base e a escala de altura de colina.

2.3.3 MODELAGEM DO AERMOD

O AERMOD modela a pluma como a combinação de dois casos limites: pluma impactando o terreno e pluma seguindo o terreno. Portanto, para todas as situações, a concentração no receptor é delimitada pela previsão dessas duas situações.

A equação geral de concentração, aplicável em condições estáveis ou convectivas é:

$$C_T\{x_r, y_r, z_r\} = f \cdot C_{c,s}\{x_r, y_r, z_r\} + (1 - f)C_{c,s}\{x_r, y_r, z_p\} \quad (2.18)$$

Onde, os subscritos c e s referem-se as camadas convectiva e superficial, respectivamente.

A figura 24 ilustra as relações de altura utilizadas no equacionamento.

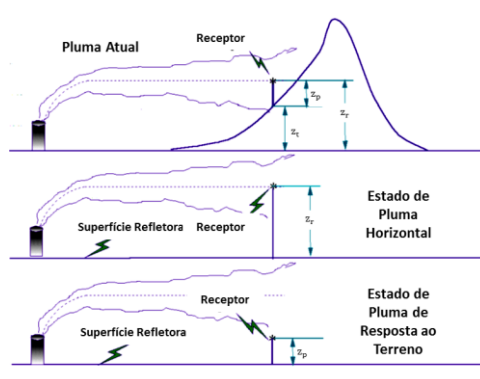


Figura 24: Escalas de altura nos dois estados de pluma considerados pelo AERMOD

Fonte: Adaptado de EPA

Para o cálculo do fator de ponderação f é necessária a especificação da altura crítica de divisão, H_c , que pode ser entendida como o nível em que o fluxo tem energia

cinética suficiente para sobrepor o terreno, ou seja, é determinado se a pluma irá colidir ou passar pelo obstáculo do terreno.

Utilizando a escala de altura específica do receptor (h_r), previamente processado pelo AERMAP, H_c é calculado a partir da seguinte equação:

$$\frac{1}{2} \cdot u^2\{H_c\} = \int_{H_c}^{h_r} N^2(h_r - z) dz \quad (2.19)$$

Onde, $u\{H_c\}$ é a velocidade do vento na altura $\{H_c\}$ e $N = \left[\frac{g}{\theta} \frac{\partial \theta}{\partial z} \right]^{1/2}$ é a frequência de Brunt-Vaisala.

Com o parâmetro H_c e a distribuição vertical de concentração no local do receptor o AERMOD pondera qual dos dois estados de pluma (colidindo ou desviando) é o mais adequado.

A fração da mássica da pluma abaixo de H_c (i. e. φ) é determinada por:

$$\varphi_p = \frac{\int_0^{H_c} C_s\{x_r, y_r, z_r\} dz}{\int_0^{\infty} C_s\{x_r, y_r, z_r\} dz} \quad (2.20)$$

Para condições convectivas $H_c = 0$ e $\varphi_p = 0$.

Como descrito por Venkatram et al. (2001) apud EPA (2004a) o fator de ponderação da pluma é dado por $f = 0,5(1 + \varphi_p)$. Quando a pluma está inteiramente abaixo da altura crítica H_c ($\varphi_p = 1,0$ e $f = 1,0$) a concentração é determinada somente por pluma horizontal. Quando a está inteiramente acima ou quando a atmosfera é neutra ou convectiva $\varphi_p = 0$ e $f = 0,5$.

A figura 25 ilustra como o fator de ponderação de pluma é obtido

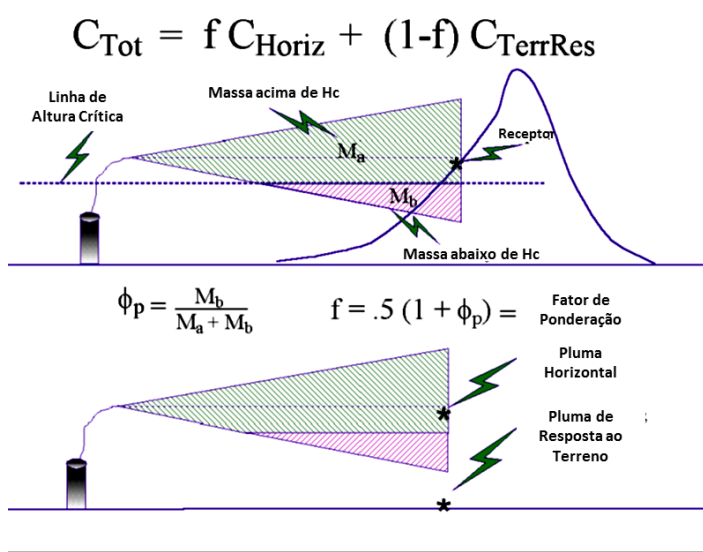


Figura 25: Tratamento do terreno pelo AERMOD e construção do fator de ponderação (f)

Fonte: Adaptado EPA

A forma geral utilizada pelo AERMOD para determinar as concentrações presentes nos termos à direita da equação 2.8, necessárias na determinação da concentração total, é:

$$C\{x, y, z\} = \left(\frac{Q}{u_p}\right) P_y\{y; z\} P_z\{y; z\} \quad (2.21)$$

A partir dos dados meteorológicos de entrada o AERMET, pré-processador do AERMOD que é descrito no tópico 2.3.1, calcula os parâmetros necessários para o processamento.

Durante condições atmosféricas estáveis, na CLS, o AERMOD estima as concentrações conforme a equação 2.22

$$C_d\{x, y, z\} = \frac{Q f_p}{\sqrt{2\pi} v \sigma_{zs}} F_y \sum_{m=-\infty}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}} \left\langle \exp \left[-\frac{(z - h_{es} - 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2} \right] + \exp \left[-\frac{(z + h_{es} + 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zs}^2} \right] \right\rangle \quad (2.22)$$

A função de dispersão lateral, F_y , é definida como:

$$F_y = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \sigma_y} \exp \left(\frac{-y^2}{2\sigma_y^2} \right) \quad (2.23)$$

Para a camada limite convectiva, a formulação da dispersão representa um dos mais significativos avanços quando comparado com outros modelos regulatórios. Supõe-se que a emissão da pluma seja segmentada e transportada através de elementos convectivos (correntes de ar ascendentes e descendentes) que se movem conforme o vento local. As velocidades verticais e laterais em cada elemento são consideradas variáveis aleatórias e caracterizadas por suas funções de densidade de probabilidade (fdp). A concentração média é encontrada a partir da fdp da posição das partículas emitidas pela fonte; por sua vez, a fdp de posição é derivada das velocidades laterais e verticais, conforme descrito por Weil et al. (1997) apud EPA (2004a)

A figura 26 mostra uma representação esquemática de uma pluma em uma CLC e o seu conjunto de média correspondente.

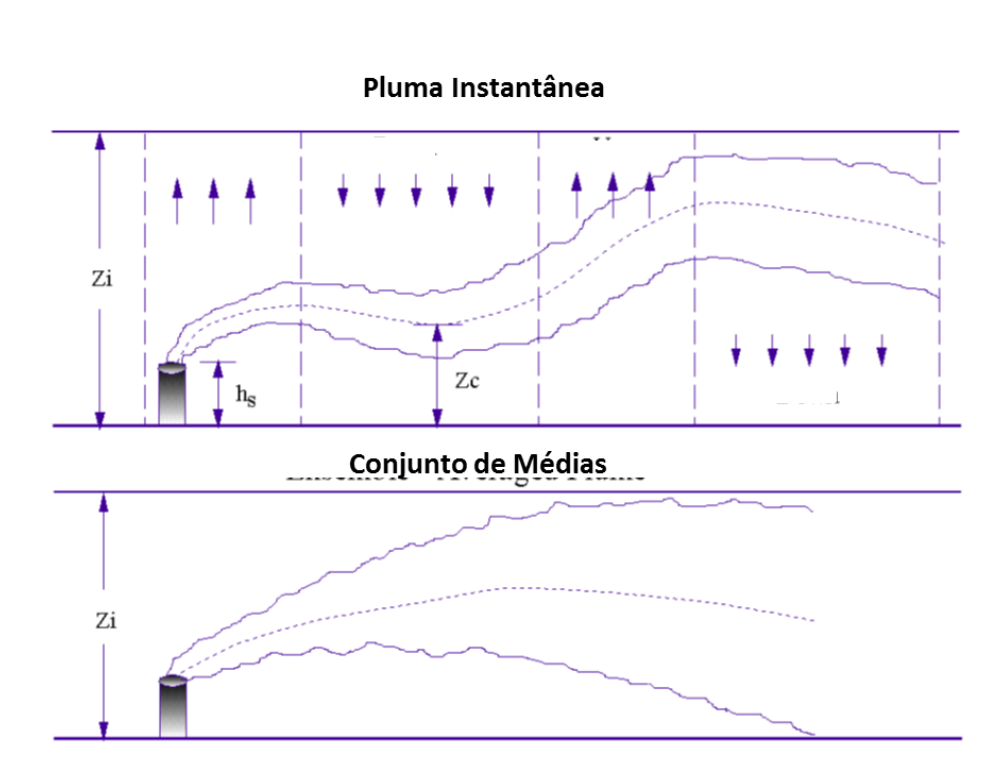


Figura 26 Representação esquemática da modelagem de uma pluma na CLC pelo AERMOD
Fonte: Adaptado de EPA (2004a)

Nota-se que uma vez que um percentual maior da pluma é influenciado por correntes descendentes, a média de comportamento apresenta uma tendência geral descendente. Sendo prevaiente, a velocidade média das correntes descendentes é menor do que a das correntes ascendentes para assegurar a conservação de massa.

No AERMOD, a fdp da velocidade vertical é modelada utilizando uma distribuição bi-Gaussiana, que foi mostrado por Baerentsen e Berkowicz (1984) apud EPA (2004a) ser uma boa aproximação; já fdp da velocidade lateral é aproximadamente Gaussiana (Lamb 1982 apud EPA 2004a).

A modelagem para a determinação da concentração total, na camada limite convectiva, considera a contribuição de três fontes distintas e é descrita pela equação 2.24:

$$C_c\{x, y, z\} = C_d\{x, y, z\} + C_r\{x, y, z\} + C_p\{x, y, z\} \quad (2.24)$$

Onde C_d , C_r , e C_p são as contribuições das fontes direta, indireta e penetrada, respectivamente.

A figura 27 representa os três tipos de fonte considerados.

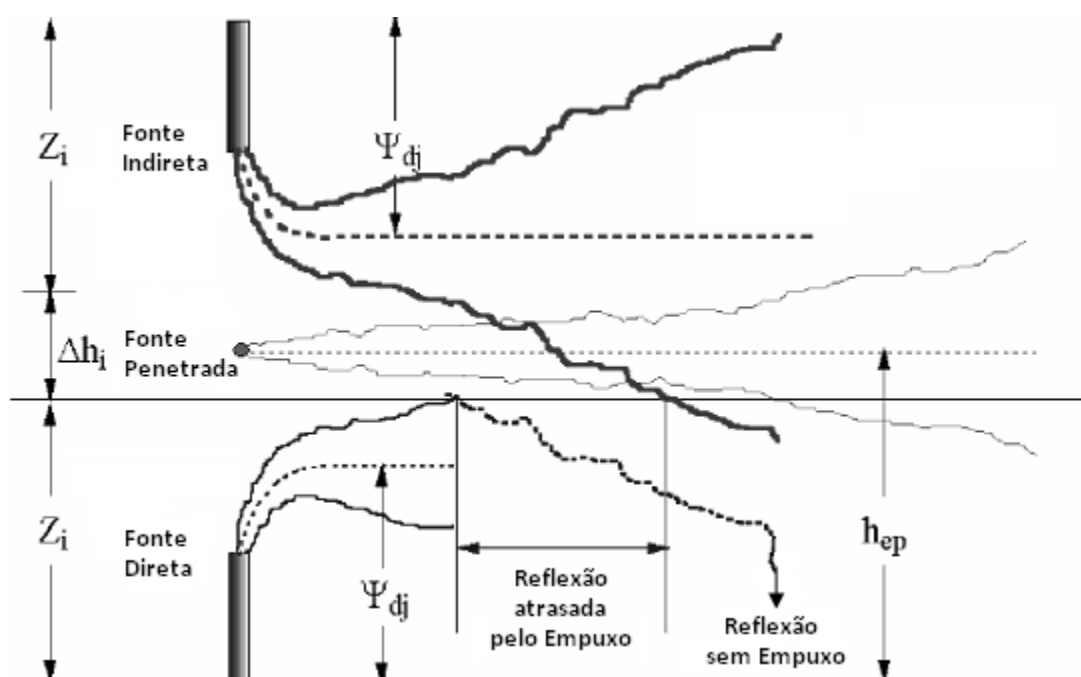


Figura 27 Tipos de fontes utilizadas pelo AERMOD para modelagem na CLC
Fonte: Adaptado de EPA (2004a)

A fonte direta é definida para tratar a parte da pluma que é transportada diretamente para o solo, além de todas as reflexões posteriores dessa porção. A fonte indireta consiste na consideração da parte da pluma que primeiro atinge a altura da camada limite convectiva e a pluma penetrada é a consideração da contribuição da fonte que penetra além do topo da camada limite convectiva (CLC).

As contribuições de cada tipo de fonte para a concentração total são mostrada nas equações 2.25, 2.26 e 2.27.

$$C_d\{x, y, z\} = \frac{Qf_P}{\sqrt{2\pi}v} F_y \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}} \left\langle \exp \left[-\frac{(z - \psi_{dj} - 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2} \right] + \exp \left[-\frac{(z + \psi_{dj} + 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2} \right] \right\rangle \quad (2.25)$$

$$C_r\{x, y, z\} = \frac{Qf_P}{\sqrt{2\pi}v} F_y \sum_{j=1}^2 \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\lambda_j}{\sigma_{zj}} \left\langle \exp \left[-\frac{(z + \psi_{rj} - 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2} \right] + \exp \left[-\frac{(z - \psi_{rj} + 2mz_i)^2}{2\sigma_{zj}^2} \right] \right\rangle \quad (2.26)$$

$$C_P\{x, y, z\} = \frac{Q(1-f_P)}{\sqrt{2\pi}v\sigma_{zp}} F_y \sum_{m=-\infty}^{\infty} \left\langle \exp \left[-\frac{(z - h_{ep} - 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zp}^2} \right] + \exp \left[-\frac{(z + h_{ep} + 2mz_{ieff})^2}{2\sigma_{zp}^2} \right] \right\rangle \quad (2.27)$$

2.4 DEFINIÇÃO DE EXERGIA

Segundo Moran e Shapiro (2002), exergia pode ser definida como sendo o maior trabalho teórico possível de ser obtido conforme um ambiente de referência interaja até o equilíbrio com o ambiente de interesse.

Para definir o ambiente de referência na análise exergética deve-se diferenciar as vizinhanças imediatas, onde as propriedades intensivas podem variar devido a interações com o sistema em análise, e uma parte maior das vizinhanças, a uma dada distância que não sofre alterações por interações com o sistema ou as vizinhanças imediatas. Essa parte maior das vizinhanças é definida como ambiente de referência.

Moran e Shapiro (2002) consideram o ambiente de referência como um sistema simples compressível, grande em extensão, com propriedades de temperatura (T_0) e pressão (P_0) constantes e livre de irreversibilidades.

Outro conceito importante para o entendimento da propriedade exergia é o de estado morto. Ele é definido como aquele em que uma quantidade fixa de matéria em consideração pode ser imaginada como selada em um invólucro impermeável, portanto sem possibilidade de escoamento de massa, em repouso em relação ao ambiente, e internamente na temperatura e pressão do ambiente. No estado morto,

tanto o sistema quanto o ambiente possuem energia, mas não possuem exergia, pois não há possibilidade de uma variação espontânea no interior do ambiente ou do sistema, nem pode haver uma interação entre eles (Santos, 2005 apud Silva, 2010).

2.4.1 DEFINIÇÃO MATEMÁTICA DE EXERGIA PARA UM VOLUME DE CONTROLE

Segundo Kotas (1995), a exergia pode ser dividida em quatro partes:

$$Ex = Ex_c + Ex_{pot} + Ex_f + Ex_q \quad (2.28)$$

Onde, Ex_c é a exergia cinética, Ex_p é a exergia potencial, Ex_f é a exergia física e Ex_q é a exergia química.

Pela possibilidade de serem completamente convertidas em trabalho, as exergias cinética e potencial são iguais às energias cinética e potencial.

$$Ex_c = \dot{m} \frac{V^2}{2} \quad (2.29)$$

$$Ex_{pot} = \dot{m}gz \quad (2.30)$$

Exergia física é igual à máxima quantidade de trabalho obtida quando o fluxo de uma substância é levado do seu estado inicial para o estado da sua vizinhança, definido por T_0 e P_0 , por processos físicos.

De acordo com Kotas (1985) a exergia física pode ser expressa como:

$$Ex_f = \dot{m}[(h - h_0) - T_0(s - s_0)] \quad (2.31)$$

Moran e Shapiro (2002) introduzem o conceito de exergia de fluxo conforme a equação 2.26, porém, podemos identificar que trata-se da junção das três formas de exergia até aqui descritas conforme a definição de Kotas (1985).

$$Ex_{fluxo} = m \left[h - h_0 - T_0(\dot{s} - s_0) + \frac{v^2}{2} + gz \right] \quad (2.32)$$

A última parcela da divisão feita por Kotas (1985) é a exergia química, que ele define como o máximo trabalho obtido quando a substância em consideração é trazida desde o estado ambiental ao equilíbrio termodinâmico completo com o estado de referência, mediante processos que envolvem transferência de calor como sistemas reativos e intercâmbio de substâncias com o entorno (sistemas não reativos).

Como o presente estudo tem por objetivo analisar a possibilidade de utilização de parte da exergia de gases de exaustão de um processo industrial por meio de extração de energia entre dois estados com temperaturas definidas, as variações de Ex_c , Ex_{pot} e Ex_q são consideradas nulas.

3 REGULAMENTAÇÃO PARA EMISSÃO DE POLUENTES

O monitoramento da qualidade do ar é essencial para avaliar os níveis de poluentes na atmosfera, e se esses níveis estão abaixo dos limites estabelecidos, que visam proteger a saúde e o bem estar da população.

Os padrões de emissão limitam a emissão de poluentes para uma determinada fonte, e devem ser comparados com os dados de emissão da fonte emissora, no caso, as chaminés do processo industrial.

Como já mencionado, as condições atmosféricas e meteorológicas locais influenciam na dispersão dos poluentes, pois incidem na movimentação das massas de ar. Desse modo, mesmo que as emissões sejam mantidas, a qualidade do ar pode sofrer alterações em função dessas condições, o que torna fundamental estudo da dispersão dos poluentes em torno da fonte emissora.

O CONAMA em 1990 estabeleceu que o nível máximo de concentração horária de dióxido de nitrogênio não deve ultrapassar $320 \mu\text{g}/\text{m}^3$, e para as concentrações com base anual o máximo permitido é $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. A Organização Mundial de Saúde (OMS) recomenda que o nível de concentração horária de NO_2 não ultrapasse $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Ao longo dos anos o CONAMA estabeleceu, em diversas resoluções, limites para a emissão de poluentes de acordo com o tipo de fonte emissora. A Resolução nº 436, de 22 de Dezembro de 2011, em complemento às Resoluções nº 05/1989 e nº 382/2006 estabeleceu que o limite de emissão para a fonte característica do processo em análise é de $700 \text{ mg}/\text{Nm}^3$ em 3 anos.

4 DADOS DE EMISSÃO DE POLUENTES

O mapa ilustrado na Figura 26 à seguir mostra as distâncias entre as fontes emissoras e as estações de medição.

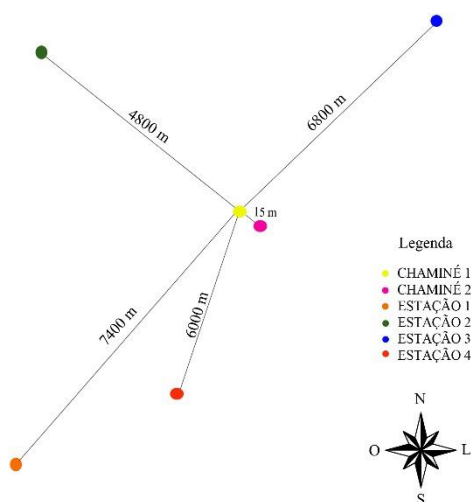


Figura 28: Mapa de Localização das Estações de Medição

Os dados ambientais obtidos pelas estações foram utilizados para as estimativas de cálculo estão nos Gráficos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 9. Esses valores foram utilizados na determinação das frações dos produtos da combustão que ocorre no processo em análise.

Como não puderam ser validados, os dados ambientais da Estação 1 não serão apresentados, entretanto, será feita a análise de dispersão para obter a provável concentração de NO_x após o aproveitamento proposto neste trabalho, já que a estimativa de concentração independe dos dados ambientais, e sim somente dos dados de emissão, da localização da estação em relação à fonte e de influências meteorológicas e topográficas.

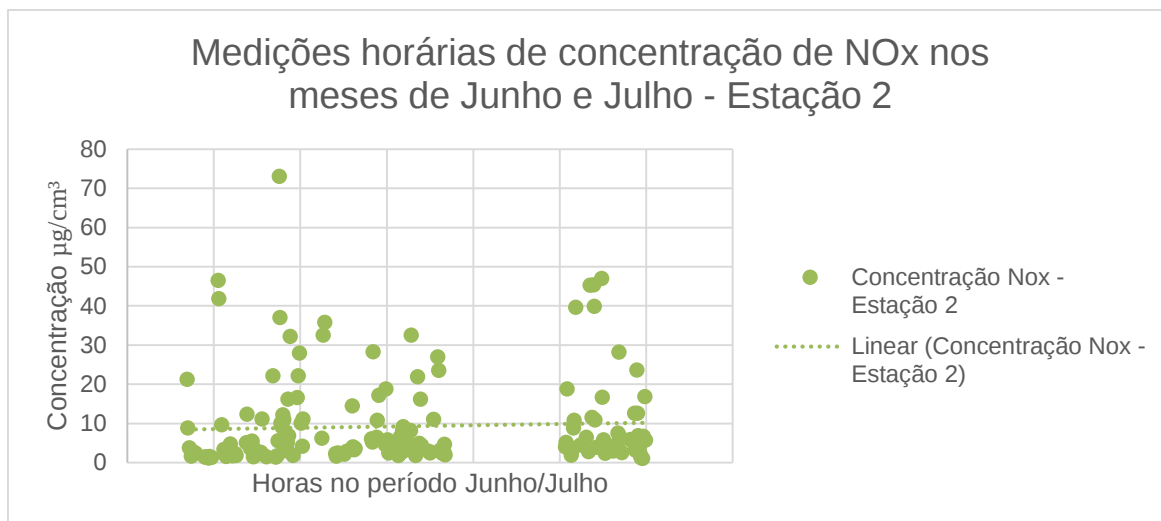


Gráfico 1: Medições horárias de concentração de NOx nos meses de Junho e Julho - Estação 2

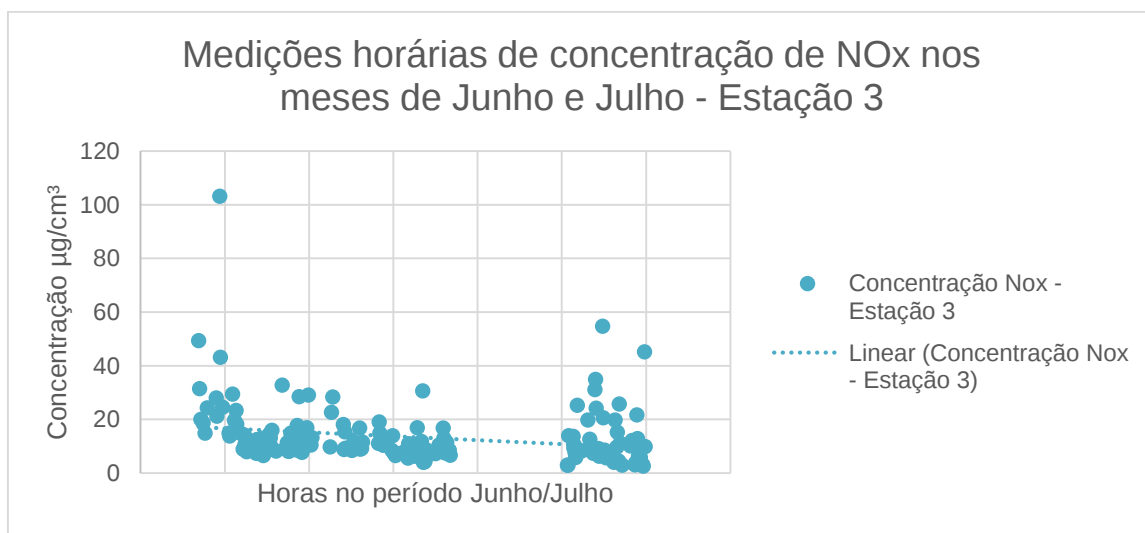


Gráfico 2: Medições horárias de concentração de NOx nos meses de Junho e Julho - Estação 3.

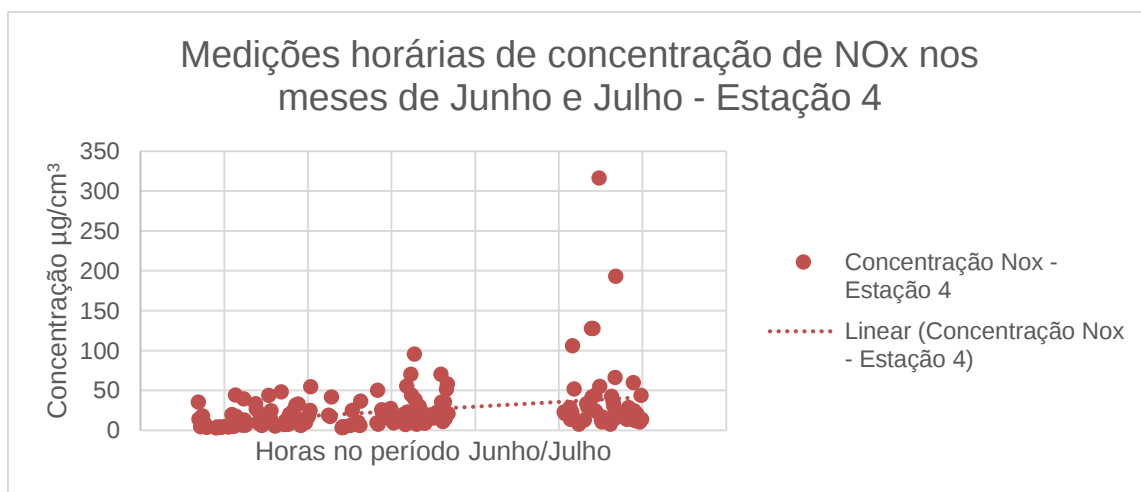


Gráfico 3: Medições horárias de concentração de NOx nos meses de Junho e Julho - Estação 4.

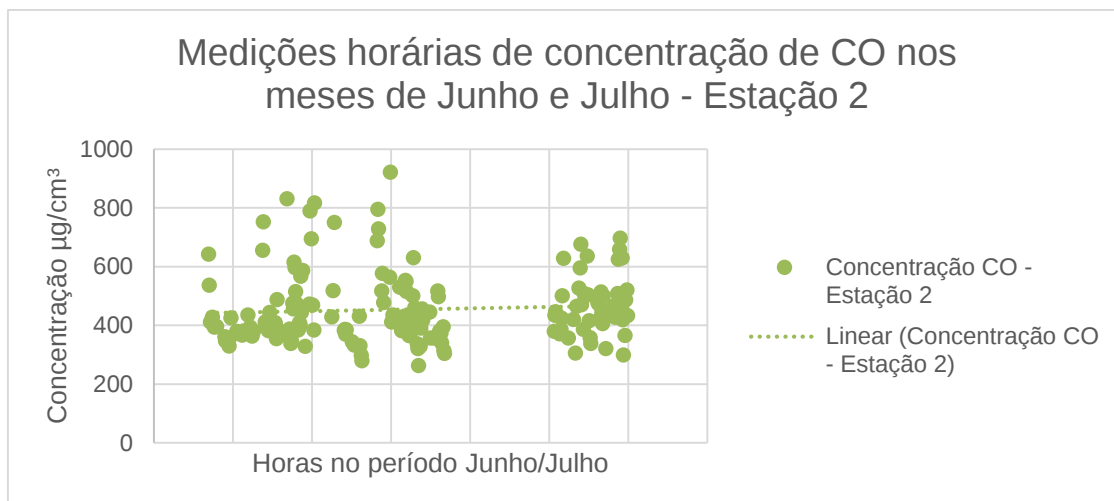


Gráfico 4: Medições horárias de concentração de CO nos meses de Junho e Julho - Estação 2

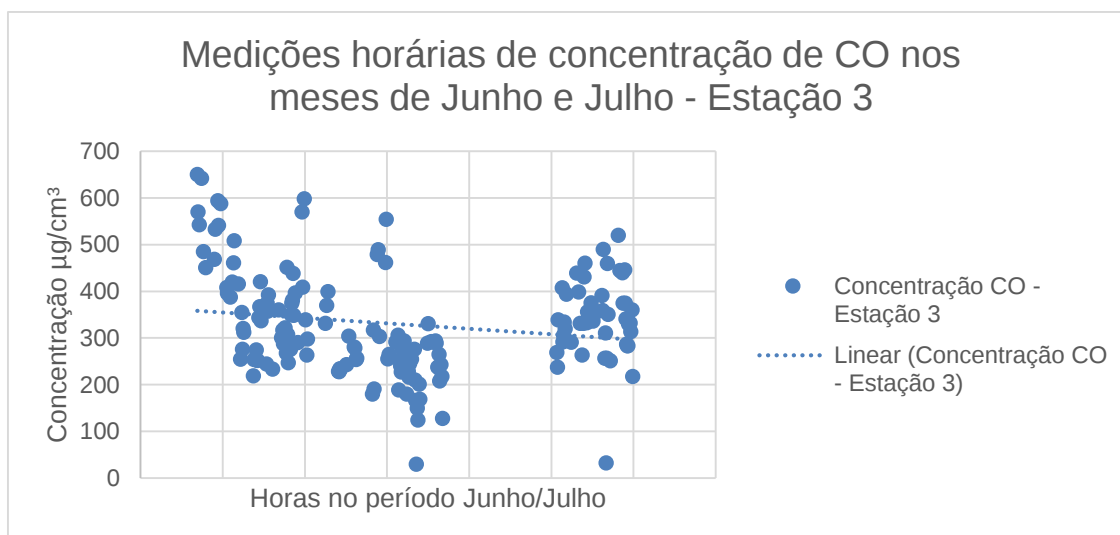


Gráfico 5: Medições horárias de concentração de CO nos meses de Junho e Julho - Estação 3

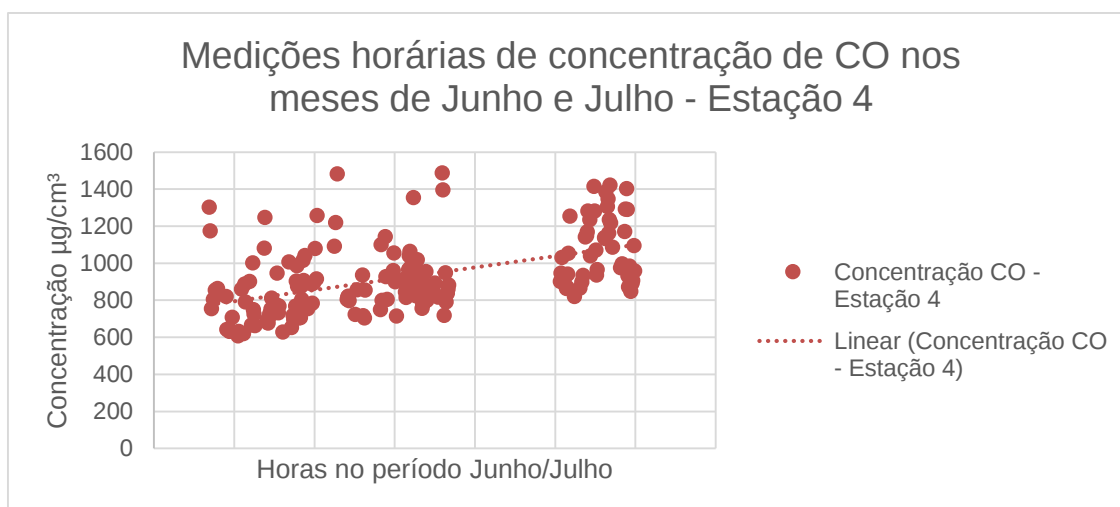
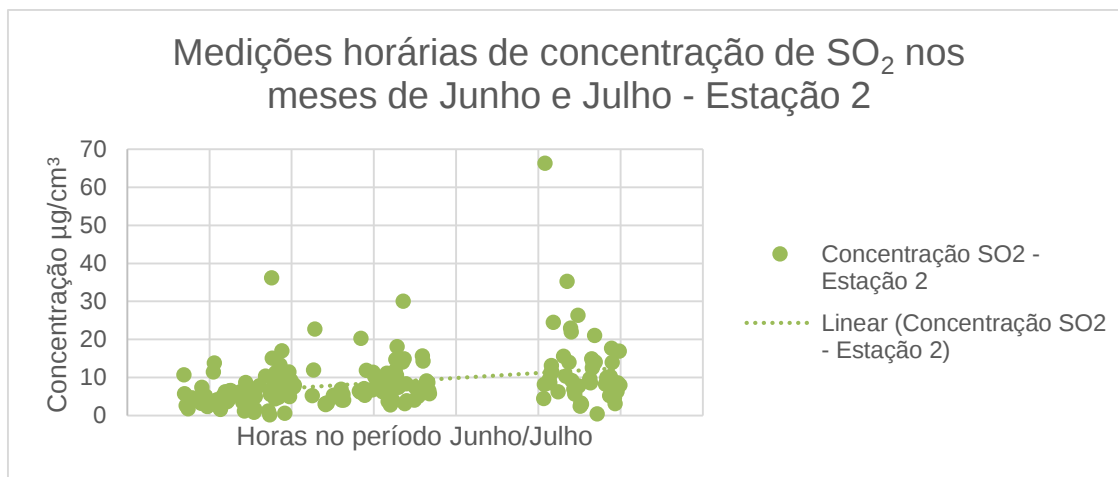
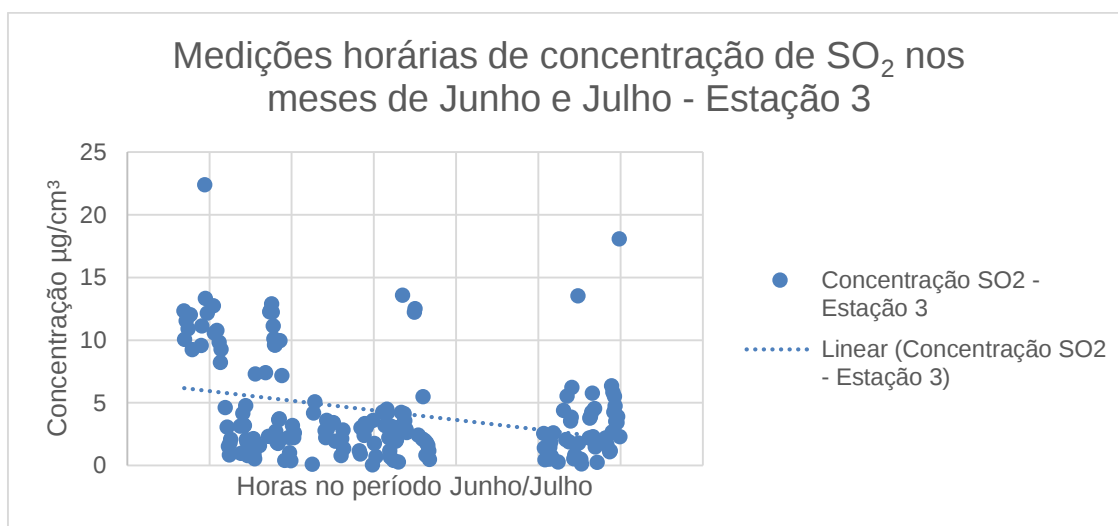
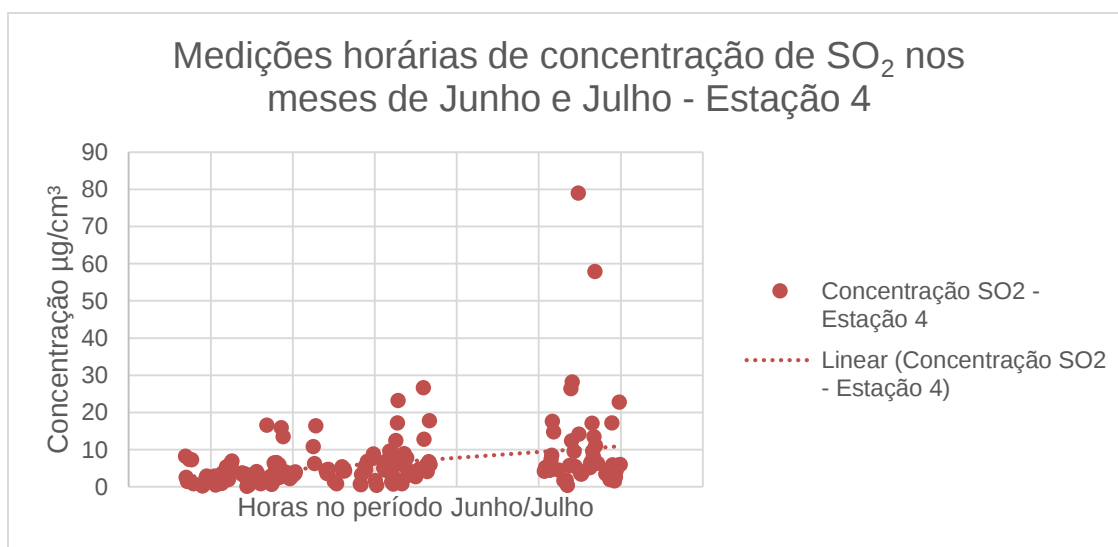


Gráfico 6: Medições horárias de concentração de CO nos meses de Junho e Julho - Estação 4

Gráfico 7: Medições horárias de concentração de SO₂ nos meses de Junho e Julho - Estação 2Gráfico 8: Medições horárias de concentração de SO₂ nos meses de Junho e Julho - Estação 3Gráfico 9: Medições horárias de concentração de SO₂ nos meses de Junho e Julho - Estação 4.

5 MODELAGEM DA COMBUSTÃO NO PROCESSO ANALISADO

Para a análise da reação de combustão que acontece no processo analisado foram utilizados os dados ambientais de emissões anteriores, mencionados na seção anterior do presente trabalho, para calcular as frações dos produtos da combustão, que estão representadas na Tabela 5.

A reação utilizada para análise considerou como reagentes o gás metano, com uma pequena quantidade de enxofre presente (impureza), e ar seco simplificado ($O_2 + 3,76N_2$).

Tabela 5 - Resultados dos Cálculos Estequiométricos com dados de Emissão

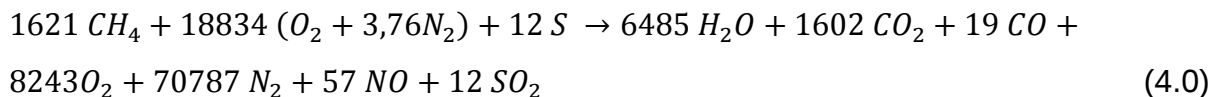
Produto da Combustão	Fração Molar
H ₂ O	0,0765
CO ₂	0,0169
CO	0,0002
O ₂	0,1631
N ₂	0,7431
SO ₂	0,0001
NO _x	0,0006

Levando em consideração que durante o processo, há injeção de ar para controle de temperatura, a determinação de relação ar/combustível real não pôde ser realizada, de modo que o balanço estequiométrico realizado, se baseou nos valores de emissões dos produtos.

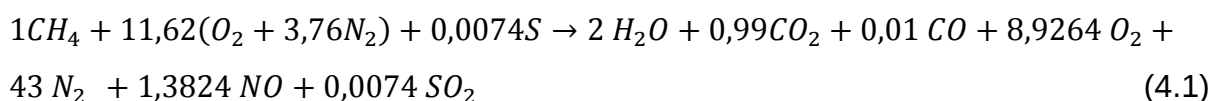
A diferença presente nas frações dos produtos nos cálculos de disponibilidade exergética de produtos e de reagentes é devido às interferências externas nas concentrações ambientais medidas.

Considerando que a análise de impacto ambiental do trabalho é feita com base nas concentrações de NO_x , o cálculo estequiométrico foi realizado visando encontrar uma relação ar/combustível capaz de fornecer a taxa de emissão de NO_x medida.

- Balanço estequiométrico usando ar padrão:



- Reação de combustão simplificada:



Com base na reação encontrada, utilizaremos os valores da Tabela 6 nos cálculos de exergia:

Tabela 6: Frações parciais dos reagentes

REAGENTE	FRAÇÃO MOLAR
CH_4	0,0177
O_2	0,2063
N_2	0,77587
S	0,00013

6 DISPONIBILIDADE EXERGÉTICA DOS GASES

Para uma mistura de gases em um processo de combustão a disponibilidade exergética dos reagentes pode ser calculada como a máxima energia que essa mistura pode fornecer até que os produtos da combustão tenham atingido a temperatura de referência:

$$Ex_R = [Ex_R]_T - [Ex_P]_{T_0} \quad (6.0)$$

$$Ex_R = \sum_{i=1}^n \dot{n}_R y_i [h_f^0 + \Delta h - T_0 (s^0(T) - R \ln y)]_i - \sum_{j=1}^m \dot{n}_P y_j [h_f^0 - T_0 (s^0(T_0) - R \ln y)]_j \quad (6.1)$$

Onde, os subscritos R e P referem-se, respectivamente, a reagentes e produtos e os subscritos i e j representam todos os gases que compõem os reagentes e os produtos, respectivamente.

Para a mistura de gases de produtos da combustão a exergia disponível é determinada como a máxima energia útil que esses gases podem fornecer até que atinjam a temperatura de referência.

$$Ex_P = [Ex_P]_T - [Ex_P]_{T_0} \quad (6.2)$$

$$Ex_P = \sum_{j=1}^m \dot{n}_P y_j [h_f^0 + \Delta h - T_0 (s^0(T) - R \ln y)]_j - \sum_{j=1}^m \dot{n}_P y_j [h_f^0 - T_0 (s^0(T_0) - R \ln y)]_j \quad (6.3)$$

Resultando em:

$$Ex_P = \sum_{j=1}^m \dot{n}_P y_j [h(T) - h(T_0) - T_0 (s^0(T) - s^0(T_0))]_j \quad (6.4)$$

A determinação da exergia disponível entre dois estados definidos para uma mistura de gases produtos de combustão é dada conforme:

$$\Delta Ex_{1 \rightarrow 2} = Ex_1 - Ex_2 \quad (6.5)$$

$$Ex_{P1} = \sum_{j=1}^m \dot{n}_P y_j [h(T_1) - h(T_0) - T_0 (s^0(T_1) - s^0(T_0))]_j \quad (6.6)$$

$$Ex_{P2} = \sum_{j=1}^m \dot{n}_P y_j [h(T_2) - h(T_0) - T_0 (s^0(T_2) - s^0(T_0))]_j \quad (6.7)$$

Logo,

$$\Delta Ex_{1 \rightarrow 2} = \sum_{j=1}^n \dot{n}_p y_j [h(T_1) - h(T_2) - T_0 (s^0(T_1) - s^0(T_2))]_j \quad (6.8)$$

A tabela 8 e o gráfico 10 apresentam os valores exergéticos calculados a partir das equações 6.1 a 6.3 para misturas de reagentes e produtos.

Tabela 8 - Exergia dos Reagentes e Produtos nas temperaturas de interesse

Temperatura (K)	Exergia (MW)	
	Reagentes	Produtos
300	652,03	0,00
393	-	9,99
482	-	32,93

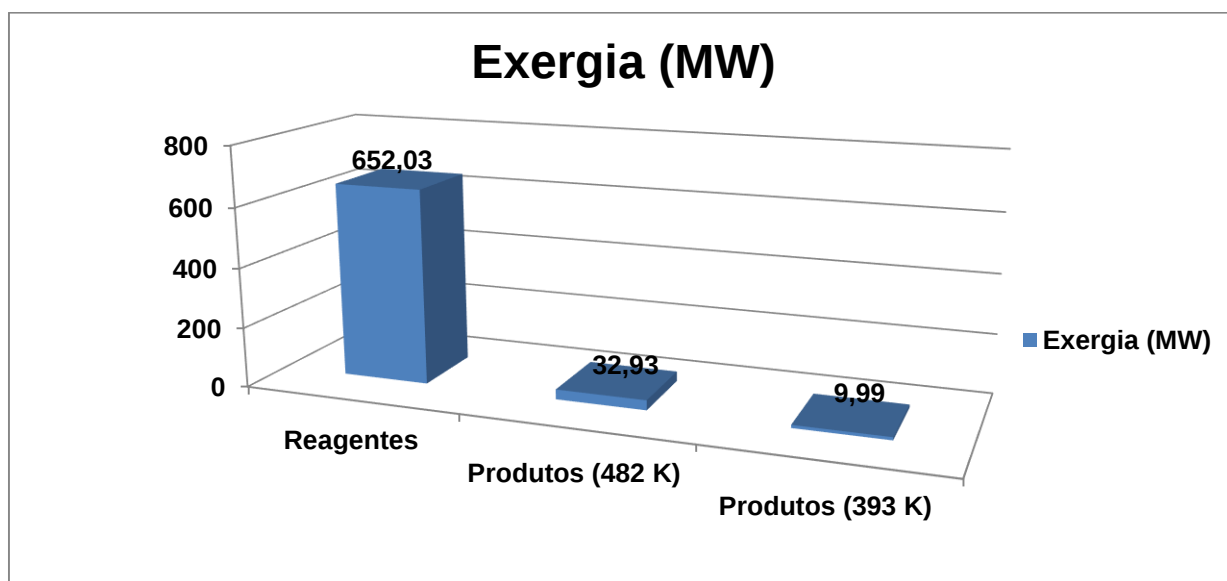


Gráfico 10: Exergia dos reagentes e produtos em dois níveis de temperatura

A máxima exergia possível de ser extraída dos gases é a diferença entre os valores calculados nos dois estados dos produtos, portanto, 22,94 MW. O gráfico 11 apresenta a relação entre a disponibilidade exergética total dos reagentes e a exergia máxima possível de ser aproveitada nos gases de exaustão.

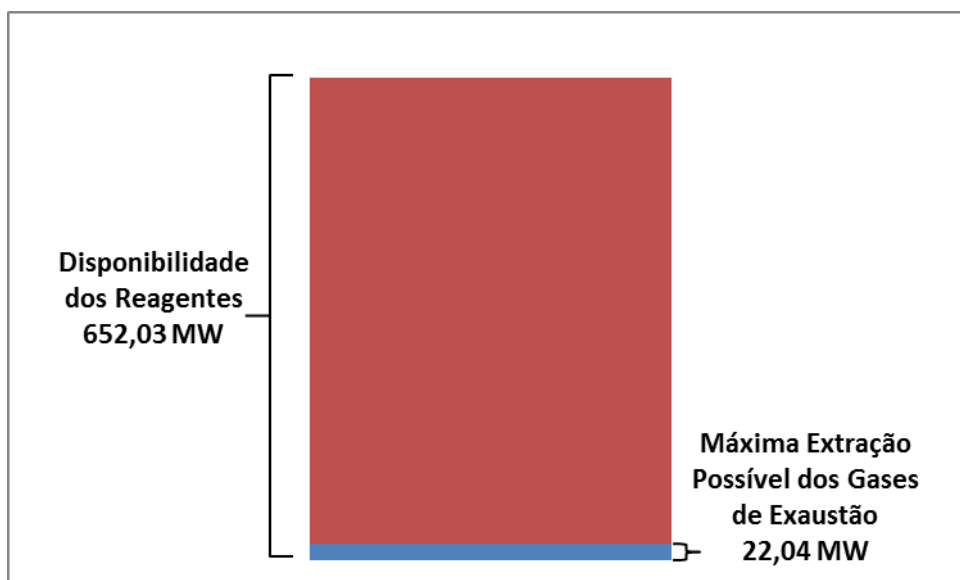


Gráfico 11: Relação entre a máxima extração de exergia possível nos gases de exaustão e a disponibilidade dos reagentes

A tabela 9 e os gráficos 12 e 13 apresentam as contribuições de cada elemento para a disponibilidade exergética total nos dois estados dos produtos.

Tabela 9 - Exergia dos elementos nos dois níveis de temperatura

Elemento	Exergia (W)	
	482 (K)	393 (K)
H ₂ O	2.774.423,08	878.193,50
CO ₂	745.050,77	227.809,11
CO	6.192,47	1.970,32
O ₂	5.198.827,33	1.643.101,83
N ₂	10.069.266,97	3.216.944,41
SO ₂	3.465.365,96	1.067.228,82
NO	10.666.564,95	2.960.524,59
Total	32.925.691,53	9.995.772,58

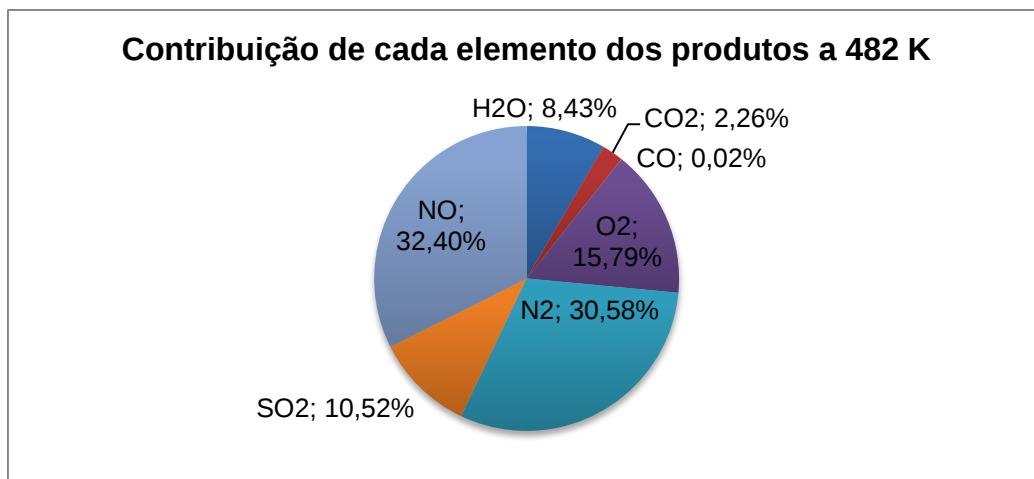


Gráfico 12: Contribuição de cada elemento para a disponibilidade exergética dos produtos a 482K

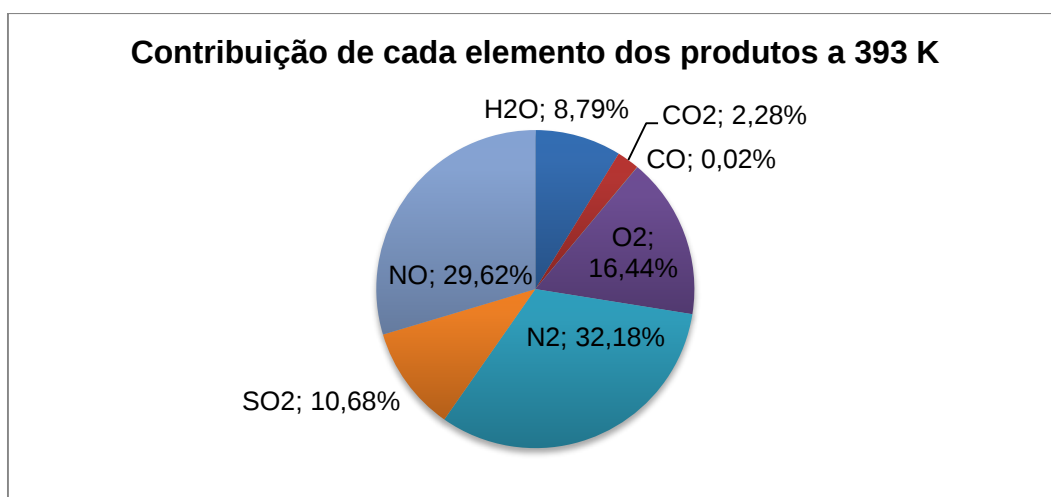


Gráfico 13: Contribuição de cada elemento para a disponibilidade exergética dos produtos a 393K

6.1 VARIAÇÃO DA DISPONIBILIDADE EM FUNÇÃO DA EXTRAÇÃO MÁSSICA

Como pode ser observado pelas equações de 6.1 a 6.8, existe uma dependência linear entre a exergia e a vazão da mistura de gases. A partir dessa relação foram calculadas as vazões mássicas necessárias para vários níveis diferentes de extração de exergia entre os estados 1 e 2. Os resultados são mostrados na tabela 10.

Tabela 10 - Relação entre exergia a ser aproveitada e a vazão mássica da mistura de gases.

Vazão Mássica (kg/s)	Disponibilidade Exergética (MW)
32,50	1
64,99	2
162,48	5
324,96	10
487,44	15
649,91	20

A tabela 11 apresenta as concentrações de NO_x emitidos em cada chaminé variando com a quantidade de exergia aproveitada.

Tabela 11 - Quantidade de NO_x emitido em cada chaminé

Disponibilidade Exergética (MW)	NO_x emitido na Chaminé 1 (kg/s)	NO_x emitido na Chaminé 2 (kg/s)
1	0,45	0,02
2	0,42	0,05
5	0,35	0,13
10	0,22	0,25
15	0,16	0,31
20	0,06	0,41

7 RELAÇÃO ENTRE POTÊNCIA APROVEITADA E EMISSÃO DE GASES

Após a realização da análise de emissão dos gases após o aproveitamento de potência foi possível construir a Tabela 12 abaixo, que relaciona a potência que pode ser reaproveitada com os máximos valores de concentração de NO_x estimados utilizando o AERMOD para cada uma das estações já mencionadas.

Tabela 7 – Máximas concentrações de NO_x estimadas para valores de potência reaproveitados

Potência (MW)	Máxima Concentração na Estação 1 (µg/m³)	Máxima Concentração na Estação 2 (µg/m³)	Máxima Concentração na Estação 3 (µg/m³)	Máxima Concentração na Estação 4 (µg/m³)
2	55,19903	83,80914	75,40774	26,29238
5	60,87264	90,53672	81,68589	38,51084
10	65,53394	93,04282	84,43944	57,78532
15	66,02819	92,78141	84,25483	64,4187
20	64,46996	90,27754	81,78378	68,87918

É possível afirmar com base nesses valores que o aproveitamento da energia disponível aumenta a concentração medida nas estações, isso porque ao retirar essa energia dos gases eles perdem um pouco da capacidade de dispersão, já que a temperatura de saída será menor do que antes do aproveitamento.

É perceptível uma redução nas máximas concentrações de NO_x entre a potência de 15 e 20 MW. Esse fato pode ser atribuído à influência dos fatores predominantes de elevação e dispersão da pluma, o empuxo térmico a quantidade de movimento. A Tabela 13 apresenta a variação das velocidades de lançamento dos gases conforme se modifica a quantidade de energia aproveitada.

Tabela 8 – Velocidade de emissão da pluma (m/s) para as duas chaminés adotadas

Energia Aproveitada (MW)	Chaminé 1	Chaminé 2
2	17,19	8,86
5	14,10	22,16
10	8,96	44,31
15	6,69	54,07
20	2,50	67,18

Observa-se m aumento significativo da velocidade de lançamento dos gases na chaminé 2 e uma redução na chaminé 1, isso deve-se às extrações mássicas feitas para visando o aproveitamento de energia.

Esse comportamento da velocidade torna o mecanismo de elevação da pluma emitida na chaminé 2 cada vez mais influenciado pela quantidade de movimento e na chaminé 1 essa predominância se reduz, sendo substituída pelo empuxo térmico, uma vez que sai com temperatura mais elevada.

Essa diferença em relação aos mecanismos de elevação da pluma explica a menor concentração mesmo com uma maior retirada de energia.

8 DETERMINAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE NO₂

As concentrações apresentadas nos tópicos anteriores são referentes à concentração de NO_x, porém, para fatores ambientais e de saúde a concentração crítica que deve ser analisada é a de dióxido de nitrogênio (NO₂)

Para estimar as concentrações de NO₂ a partir das concentrações encontradas para o NO_x, em casos de concentração constante de O₃, Janssen et. al.(1988) propôs a equação 8.0 abaixo descrita, que deve ser usada em casos de mistura completamente homogênea entre NO e O₃ na pluma.

$$\frac{NO_2}{NO_x} = A(1 - \exp(-\alpha x)) \quad (8.0)$$

Onde:

$$\alpha = \frac{k_1[O_3]}{v} [Km^{-1}] \quad (8.1)$$

$$A = \left(\frac{k_2}{k_1[O_3]} + 1 \right)^{-1} [Adimensional] \quad (8.2)$$

As equações 8.1 e 8.2 levam em consideração a concentração de ozônio local, já que a formação do NO₂ em sua maior parte se dá pela reação 2.6 mencionada anteriormente, e a equação 8.1 considera a velocidade do vento, pois quanto maior a velocidade maior será a relação NO₂/NO_x.

A equação 8.0 determina a quanto do NO formado na chaminé se transformou em NO₂ em função da distância entre a fonte emissora e a estação de medição, além da velocidade do vento e da concentração de oxônio local.

A constante k₁ é a constante de reação do NO com o O₃, e segundo Becker e Schurath (1975) *apud* Janssen (1988) são iguais a 29 ppm⁻¹min⁻¹. E k₃ é a constante relacionada com a taxa de foto dissociação do NO₂ em função da radiação (equação 8.3).



A taxa de foto dissociação k_3 depende da intensidade da radiação solar e apresenta valores entre 0 (no escuro) e $0,55 \text{ min}^{-1}$ (em pleno sol). (Parrish et al., 1983 *apud* Janssen 1988).

Porém, para casos reais em que a mistura não é homogênea, a utilização das equações 8.0 a 8.2 fornecerão resultados não realísticos, pois implicam uma consideração de concentração espacial de O_3 constante, que só poderia existir se o processo de transporte de O_3 ocorre-se em uma velocidade muito maior do que a da reação química de dissociação, fato que não acontece.

Janssen (1988) conclui que em casos de mistura não homogênea o fator α passa ser dependente também de outros fatores, como os meteorológicos, além dos já citados velocidade do vento e concentração de O_3 . Janssen (1988) também apresenta valores encontrados para A e α relativos a algumas classes de incidência de radiação. A Figura 29 apresenta os valores para a radiação referente ao local analisado no presente trabalho.

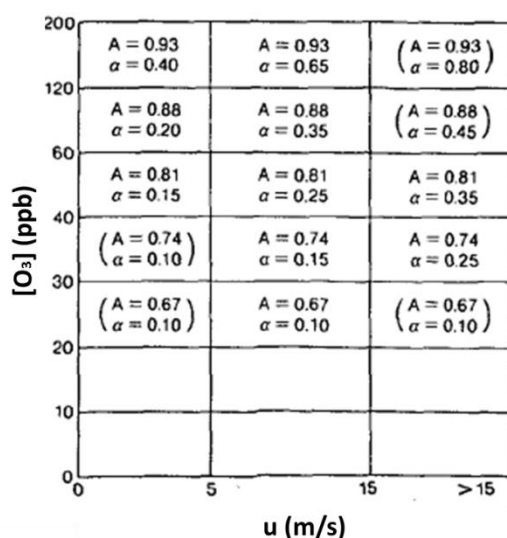


Figura 29: Valores de α e A para a localidade estudada.

Fonte: Adaptado de Janssen (1988)

Os valores apresentados entre parênteses são resultados de interpolação e extrapolação de outros valores medidos (Janssen 1988).

Para a região estudada, a concentração de oxônio é de aproximadamente 22,18 ppb, e as velocidades do vento estão determinadas na Tabela 9 abaixo, para cada estação.

Tabela 9 – Faixa de velocidade típica para cada estação no período analisado

Estação	Variação da Velocidade (m/s)
1	3,6 – 5,7
2	2,1 – 3,6
3	5,7 – 8,8
4	0,5 – 2,1

Com base na Figura 29 são adotados 0,67 e 0,10 como valores de A e α , respectivamente, para determinar a relação NO_2/NO_x em cada estação. Assim sendo, com base nesses valores e nas distâncias entre a fonte emissora e as estações, foram calculadas as relações NO_2/NO_x para cada estação.

Tabela 10 – Distância entre estação e fonte emissora, e relação entre NO_2 e NO_x

Estação	Distância x(Km)	NO_2/NO_x
1	7,4	0,3503
2	4,8	0,2554
3	6,8	0,3306
4	6,0	0,3023

Como é possível perceber ao analisar a Tabela 10 acima, a porcentagem de NO_2 que foi formado a partir do NO emitido pela chaminé situa-se entre 25 e 35% para as estações estudadas.

O Gráfico 14 abaixo representa a variação da relação entre NO_2 e NO_x em função da distância.

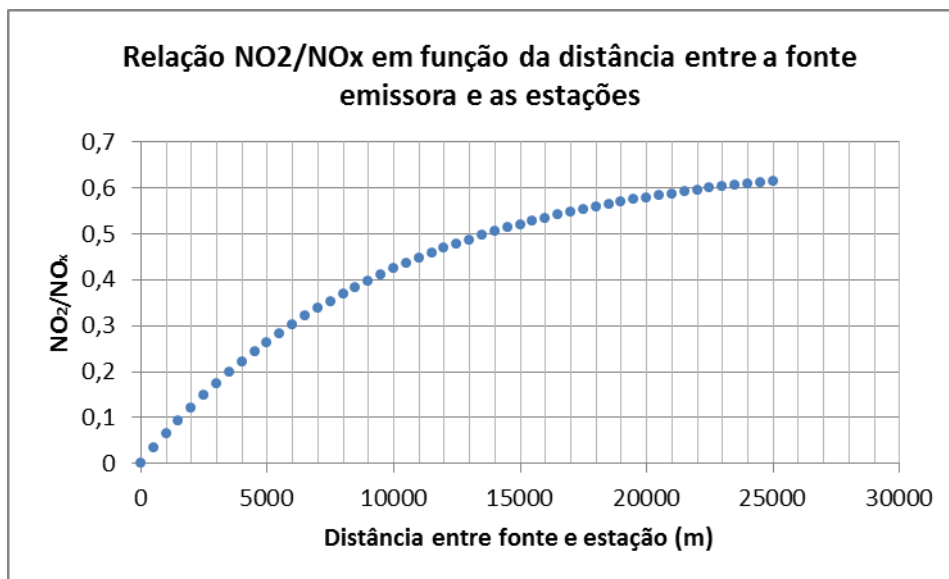


Gráfico 14: Relação NO₂/NO_x em função da distância entre a fonte

Sendo assim, levando em consideração os valores de NO_x estimados anteriormente teremos:

Tabela 11 - Máximas concentrações de NO_x estimadas para valores de potência reaproveitados

Potência (MW)	Máxima Concentração de NO ₂ na Estação 1 (µg/m ³)	Máxima Concentração de NO ₂ na Estação 2 (µg/m ³)	Máxima Concentração de NO ₂ na Estação 3 (µg/m ³)	Máxima Concentração de NO ₂ na Estação 4 (µg/m ³)
2	19,3362	21,4049	24,9298	7,9482
5	21,3237	23,1231	27,0054	11,6418
10	22,9565	23,7631	27,9157	17,4685
15	23,1297	23,6964	27,8546	19,4738
20	22,5838	23,0569	27,0377	20,8222

Avaliando os resultados obtidos, é possível afirmar que os valores estimados de emissão para todos os valores de potência aproveitados estão dentro do limite ambiental vigente.

9 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo estabelecer valores de disponibilidade energética que pode ser aproveitada, analisar a dispersão dos óxidos de nitrogênio emitidos e averiguar se os padrões de legislação vigente estão sendo respeitadas. Os primeiros capítulos foram dedicados a expor a necessidade do aproveitamento de energia, através de revisão histórica e projeção futura, e fundamentação teórica sobre poluição atmosférica, formação de óxidos, dispersão atmosférica, exergia e descrição do modelo adotado.

A análise realizada mostrou que há a possibilidade de aproveitamento de uma grande quantidade de energia no processo analisado sem que as concentrações dos poluentes de interesse ultrapasassem os valores críticos regulamentados.

A utilização do modelo AERMOD se mostrou adequada para o propósito deste trabalho, porém, análises realizadas através de outros programas (livres e/ou comerciais) podem ser realizadas para dar maior sustentação teórica aos resultados encontrados.

Uma das maiores dificuldades encontrada na realização do trabalho foi determinar a resolução ambiental vigente no Brasil para regulamentação das concentrações de poluentes, devido à grande quantidade de regulamentações existentes que, por muitas vezes, são conflitantes.

Para trabalhos futuros, a análise das principais fontes que contribuem para a concentração de poluentes em uma determinada estação pode ser abordada, diferentemente deste trabalho que focou em uma fonte e analisou sua contribuição para a concentração em diversas estações de medição.

Como continuação do presente trabalho, sugerimos, determinar as melhores formas de aproveitar a exergia disponível, como por exemplo uso de turbina à gás para a geração de potência, e verificar viabilidade econômica de implantação da proposta.

E como atividades paralelas ao presente trabalho sugerimos utilizar softwares com diferentes abordagens para analisar o problema proposto, e comparar os resultados,

e/ou analisar as principais fontes que contribuem para a concentração de poluentes em uma determinada região.

10 REFERÊNCIAS

- ARYA, S.P., 1999. *Air Pollution Meteorology and Dispersion*. 310p. Oxford University Press.
- BAERENTSEN, J. H. ; BERKOWICZ R., (1984) *Monte Carlo simulation of plume dispersion in the convective boundary layer*. *Atmos. Environ.*, 18, 701-712.
- BECKER, K.H., SCHURATH U. (1975) *Der Einfluss von Stickstoffoxiden auf atmosphärische Oxidationsprozesse*; *Staub*35:156-161
- BOUBEL, R.W., FOX, D.L., TURNER, D.B., STERN, A.C. (1994): *Fundamentals of Air Pollution*. Academic Press. Third Edition.
- CANELAS, L. B. D. *Dispersão de gases poluentes na área de sines*. 1983. 382p. Tese (Doutorado) - Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Lisboa, 1983.
- CHIGIER, N. *Energy, Combustion and Environment*. U.S.A.: McGrall-Hill, 1981.
- COOPER, C. D.; ALLEY, F. C. *Air pollution control: A design approach*. Long Grove, Illinois: Waveland Press, Inc, 2002, 738 p.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA/MMA, **Resolução nº 05**, de 15 de Junho de 1989.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA/MMA, **Resolução nº 03** de 28 de Junho de 1990.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA/MMA, **Resolução nº 436** de 22 de Dezembro de 2011.
- CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE – CONAMA/MMA, **Resolução nº 382** de 26 de Dezembro de 2006.
- CÓNSUL, J.M. D.;THIELE, D.;VESES,R. C.; BAIBICH, I. M.; DALLAGO, R. M. D. (2004). **Decomposição catalítica de óxidos de nitrogênio**. Química Nova, vol. 27, no.3. São Paulo.

CORRÊA, C. S. **Estudo micrometeorológico da camada limite planetária estável na região de porto alegre**. 1997. 50p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

DEGRAZIA, G.A., **Aplicação de um modelo gaussiano nas estimativas de concentrações superficiais na camada limite convectiva de Candiota**. *Air Pollution and Acid Rain: The Candiota Program*, 1996, Bauru, Anais do Workshop on *Air Pollution and Acid Rain: The Candiota Program* Bauru, FAPESP, 1996, Editors: O.L.L. Moraes, A.P. Oliveira, E.S. Caetano Neto, G.A. Degrazia, p. 78-85.

EPA. **Aermod: description of model formulation**. 2004a. 85p. EPA-454/R-03-004. U.S. Environmental Protection Agency, North Carolina, 2004a.

EPA. **Users guide for the AERMOD meteorological preprocessor (AERMET)**. **2004b**. EPA-454/B-03-002. U.S. Environmental Protection Agency, North Carolina, 2004b.

EPA. **Users guide for the AERMOD terrain preprocessor (AERMAP)**. EPA-454/B-03-002. 2004c. 107p. U.S. Environmental Protection Agency, North Carolina, 2004c.

FERREIRA, M. S. **Simulação do transporte de poluentes atmosféricos na bacia aérea III da região metropolitana do Rio de Janeiro via o modelo AERMOD**. 2005. 193p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2005.

GOLDEMBERG, JOSÉ (2009). **Biomassa e Energia**. Química Nova, vol. 32, no.3. São Paulo.

GOMES, E. L. M.; BIASUTTI, S. **Avaliação do desempenho dos modelos de qualidade do ar AERMOD e CALPUFF na região de Anchieta-ES**. 2012. 145p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

HANNA, S. R.; BRIGGS, G. A.; HOSKER, R. P. Jr. **Handbook on atmospheric diffusion**. 1982. 102p. Technical Information Center, U.S. Department of Energy, Springfield, 1982.

HAYHURST, A.N.; VINCE, I.M., 1980, **Nitric Oxide Formation from N₂ in Flames: The Importance of Prompt NO**, Progress in Energy and Combustion Science, 6, 35-51.

JANSSEN, L. H. J. M.; VAN WAKEREN, J. H. A.; VAN DUREN, H.; ELSHOUT, A. J. (1988). **A classification of NO oxidation rates in Power Plant Plumes based on Atmospheric conditions**. Atmospheric Environment, Vol. 22, nº 1, p. 43 – 53.

KAWANO, M. **Desenvolvimento, validação e aplicação de um modelo matemático para dispersão de poluentes atmosféricos**. 2003. 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

KOTAS, T. J. **The Exergy Method of Thermal Plant Analysis**. Krieger Pub. Company, 1995. 327p.

LAMB, R. G., (1982) **Diffusion in the convective boundary layer**. *Atmospheric Turbulence and Air Pollution Modelling*. Nieuwstadt, F. T. M. and van Dop, H., Reidel, 159-229pp.

LONGHETTO, A. **Atmospheric Planetary Boundary Layer Physics**. 1 ed. New York: Elsevier, 1980, 567 p.

MALISKA, C.R. **Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos Computacional**, 2ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012, 472p.

MELO, A. M. V. **Avaliação de desempenho dos modelos aermod e calpuff associados ao modelo prime**. 2011. 149p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2011.

MINISTÉRIO DE MEIO AMBIENTE. **Gás Natural**. Brasília, 2014. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/clima/energia/fontes-convencionais-de-energia/gas-natural>> Acesso em: 29 jun. 2014

MINISTÉRIO DE MEIO AMBIENTE. **Poluentes Atmosféricos**. Brasília, 2014. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/qualidade-do-ar/poluentes-atmosf%C3%A9ricos#Dioxido_de_nitrogenio> Acesso em: 28 jun. 2014

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, **Plano Nacional de Energia - 2030**, Secretaria de Energia, DF, 2006-2007.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, **Resenha Energética Brasileira**, Secretaria de Energia, DF, 2013.

MORAES, M. R. **Ferramentas para a previsão de vento e dispersão de poluentes na micro-escala atmosférica**. 2004. 143p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

MORAES, M. R. **Implementação de um sistema de modelos para a qualidade do ar**. 2001. 109p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001.

MORAN, M. J.; SHAPIRO, H. N. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**, 4ª Ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002, 472p.

NEDEL, A.S. **Aplicação de um Modelo de Dispersão de Poluentes na Região de Candiota-RS e sua Relação com as Condições Meteorológicas**. 2003. 129p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Rio Grande do Sul, 2003.

PARRISH, D.D., MURPHY P.O., ALBRITTON D.L., Kehsenfeld F.C. (1983) *The measurement of the photodissociation rate of NO_x in the atmosphere* *Atmospheric Environment* 17: 1365-1379.

PASQUILL, F. (1961) *The Estimation of the Dispersion of Windborne Material*, *Meteorol. Mag.*, 90: 33-49.

SEINFELD, J.H; PANDIS, S.N. **Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change**. Wiley –Interscience, 2ª ed, 2006

SANTIAGO, A. M. **Simulação da camada limite planetária sobre a região metropolitana da grande vitória com o uso do modelo de mesoescala WRF**. 2009. 138p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2009.

SILVA, A. M.; SARNAGLIA, V. D. M.; **Estudo da Qualidade do Ar na Região Metropolitana da Grande Vitória Empregando um Modelo de Dispersão Atmosférica - CALPUFF**. 2010. 143p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2010.

SOARES, L. A.; RAMALDES, L. N. **Estudo comparativo dos modelos de dispersão atmosférica - calpuff e aermod - através da análise da qualidade do ar na região metropolitana da grande Vitória.** 2012. 110p. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

STULL, R. B. ***An introduction to boundary layer meteorology.*** Kluwer Academic Publishers. 7th edition. 1988.

TEIXEIRA, F. N.; LORA, E. S. (2004). **Experimental and analytical evolution of NO_x emissions in bagasse boilers.** Biomass and Bioenergy; 26: p. 571 – 577.

TURNER, D. B. ***Workbook of Atmospheric Dispersion Estimates.*** 1970. 84p. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Research Triangle Park, North Carolina, 1970.

VAZ, E. L. S.; CODARO, E. N.; ACCIARI, H. A., **Efeito dos Óxidos de Nitrogênio e de Enxofre na Corrosão de Cobre e Zinco: Um Experimento para o Ensino da Corrosão,** *Rev. Virtual Quim.* ISSN 1984-6835, 10 de junho de 2013.

VENKATRAM J. C., PAINE, R. J., LEE J. T., CIMORELLI A. J., PERRY S. G., WILSON D. J., WEIL J. C., PETERS W. D., 2001: ***AERMOD: A dispersion model for industrial source applications Part III: Performance Evaluation.*** *J.Appl.Meteor.*

VICENTINI, P. C. **Uso de modelos de qualidade do ar para a avaliação do efeito do PROCONVE entre 2008 e 2020 na região metropolitana do Rio de Janeiro.** 2011. 224p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2011.

WEBB, A. H.; HUNTER, G. C. (1998). **Power-station contributions to local concentrations of NO₂ at ground level.** Environmental Pollution; 102: p. 283-288.

WEIL, J. C., CORIO L. A., BROWER R. P., (1997) ***A PDF dispersion model for buoyant plumes in the convective boundary layer.*** *J.Appl.Meteor.*, **36**, 982-1003