



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

VALÉRIO DE ARAÚJO GOMES

Modelagem e simulação da dispersão das emissões de fluoreto gasoso de uma redução eletrolítica de alumínio

Campina Grande – PB

2007

VALÉRIO DE ARAÚJO GOMES

Modelagem e simulação da dispersão das emissões de fluoreto gasoso de uma redução eletrolítica de alumínio

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de concentração:
Modelagem e Simulação

Orientador:
Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves

Coorientador:
Prof. Dr. Michel François Fossy

Campina Grande - PB

2007

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

G633m

Gomes, Valério de Araújo.

Modelagem e simulação da dispersão das emissões de fluoreto gasoso de
uma redução eletrolítica de alumínio / Valério de Araújo Gomes. –
Campina Grande, 2017.

90 f. : il. color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de
Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2007.

"Orientação: Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves, Prof. Dr. Michel François
Fossy".

Referências.

1. Dispersão Atmosférica. 2. CALPUFF. 3. BLP. 4. Modelo Gaussiano. I.
Alves, José Jailson Nicácio. II. Fossy, Michel François. III. Título.

CDU 66.02(043)

Nome: GOMES, Valério de Araújo

Título: Modelagem e simulação da dispersão das emissões de fluoreto gasoso de uma redução eletrolítica de alumínio

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Campina Grande para obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Aprovado em: ____/____/____

Banca Examinadora

Prof. Dr. Fernando Fernandes Vieira – Examinador externo
Universidade Estadual da Paraíba – UEPB

Prof. Dr. Ana Cristina Silva Muniz – Examinadora externa
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Prof. Dr. José Jailson Nicácio Alves – Orientador
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

Prof. Dr. Michel François Fossy – Coorientador
Universidade Federal de Campina Grande - UFCG

AGRADECIMENTOS

À Mazé e aos meus filhos Caio Luca e Ian Gabriel pelo incentivo, companheirismo e compreensão;

À Universidade Federal de Campina Grande;

Aos Sr. Domingos Campos Neto, pelo apoio e estímulo ao desenvolvimento deste projeto;

Ao Consórcio de Alumínio do Maranhão – Alumar, por acreditar, incentivar e financiar este projeto;

Aos amigos da turma de graduação de engenharia química do ano de 2001, que de alguma forma me ajudaram e fizeram parte do meu aprendizado;

Ao amigo Eduardo Costa pelo exemplo de determinação;

Ao amigo Leonardo Carvalho pelo incentivo aos estudos voltados a engenharia.

Heróis da Fé

*“A fé é a certeza de que vamos receber
as coisas que esperamos e a prova de
que existem coisas que não podemos ver.”*

(Hebreus 11:1)

RESUMO

GOMES, Valerio de A., **Modelagem e simulação da dispersão das emissões de fluoreto gasoso de uma redução eletrolítica de alumínio**, 2007. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2007.

A determinação de concentração de poluentes lançados na atmosfera é um elemento importante na previsão de impactos ambientais causados por emissões de efluentes industriais, sendo fundamental na avaliação de viabilidade de novas plantas, ou mesmo para plantas existentes. Em função da ampliação dos parques industriais e da aproximação dos centros urbanos, cada vez mais fica evidente a necessidade de dispor de dados de simulações da qualidade do ar, para tomar decisões em relação ao tipo de tratamento dos efluentes gasosos, posicionamento de plantas, projetos de chaminés (altura), e principalmente do tipo de controle e processo que será necessário para minimizar as concentrações lançadas no meio ambiente.

O presente trabalho teve como objetivo, principalmente, desenvolver uma rotina aplicada as emissões de fluoreto gasoso proveniente de reduções eletrolíticas de alumínio. A referência adotada foi o modelo desenvolvido pela *Environmental Research & Technology Inc.* chamado BLP – *Buoyant Line and Point Source* (modelo fundamentado na distribuição gaussiana), aplicando algumas considerações específicas. A implementação foi realizada utilizando o *Mathcad 11 Enterprise Edition*. Posteriormente ao desenvolvimento foram feitas várias simulações com informações coletadas pelo programa de monitoramento de fontes estacionárias da Alumar e comparados com os dados coletados na estação de monitoramento contínuo de qualidade do ar localizada na vila de Coqueiro (intermediações do limite da fábrica, 2,500 Km).

Complementarmente, também foi realizada uma simulação para comparar o resultado do modelo proposto com os resultados do CALPUFF (software comercial referendado pela EPA – *Environmental Protection Agency*) que foi utilizado durante a elaboração do estudo de impacto ambiental da complementação da sala de cubas – linha 3.

O modelo proposto apresentou uma correlação de 82% com os dados históricos coletados na estação localizada na vila de Coqueiro e um erro de 4,35% quando comparado com as simulações do CALPUFF.

Palavras-Chaves: Dispersão atmosférica, CALPUFF, BLP, modelo gaussiano.

ABSTRACT

GOMES, Valerio de A., **Modeling and simulation of gaseous fluoride emissions dispersion from an electrolytic smelting of aluminum**, 2007. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Campina Grande, Paraíba, 2007.

The determination of the pollutants concentration released into the atmosphere is an important element in the prediction of environmental impacts caused by emissions from industrial effluents, being fundamental in the feasibility evaluation of new plants, or even for existing plants. Due to the industrial parks expansion and the approximation of urban centers, it is increasingly evident that there is a need for air quality simulation data to make decisions regarding the type of treatment of gaseous effluents, plant positioning, chimneys dimensions (height), and especially of the type of control and process that will be necessary to minimize the concentrations released in the environment.

The main objective of this work was to develop a routine applied to the emission of gaseous fluoride from electrolytic smelting of aluminum. The reference adopted was the model developed by Environmental Research & Technology Inc called BLP - Buoyant Line and Point Source (model based on the Gaussian distribution), applying some specific considerations. The implementation was performed using Mathcad 11 Enterprise Edition. After the development, several simulations were carried out with information collected by Alumar's stationary source monitoring program and compared to the data collected at the continuous air quality monitoring station located in the village of Coqueiro (distant 2,500 km).

In addition, simulations were also carried out to compare the results of the proposed model with the results from CALPUFF (commercial software endorsed by the EPA - Environmental Protection Agency) that was used during the elaboration of the environmental impact study of the complementation of the potroom - line 3.

The proposed model presented a correlation of 82% with the historical data collected at the station located in the village of Coqueiro and an error of 4.35% when compared to the simulations of the CALPUFF.

Key Words: Air dispersion, CALPUFF, BLP model, gaussian model.

LISTA DE SIMBOLOS E SIGLAS

BLP	<i>Buoyant Line and Point</i>
CONAMA	Conselho Nacional de Meio Ambiente
$C(x,y,z)$	Concentração do poluente à sotavento da fonte no ponto (x,y,z)
d	Diâmetros dos três fornos (m)
D	Altura estimada da camada limite
g1	Aceleração da gravidade - m/s^2
H	Altura efetiva da chaminé (m)
Hsc	Altura comum das Salas de Cubas (m)
LL1	Comprimento da Linha 1 (m)
LL2	Comprimento da Linha 2 (m)
LL3	Comprimento da Linha 3 (m)
P	Classe de Estabilidade Atmosférica
Q	Vazão mássica de emissão (vazão de lançamento do gás, g/s)
Q3	Vazão mássica de emissão do forno 3 (vazão de lançamento do gás, g/s)
QL1	Taxa de emissão da linha 1 (g/m/s)

QL2	Taxa de emissão da linha 2 (g/m/s)
QL3	Taxa de emissão da linha 3 (g/m/s)
Ta	Temperatura Ambiente (K)
Ts	Temperatura média de saída dos gases dos três fornos (K)
TsL1	Temperatura de saída dos gases da linha 1 (K)
TsL2	Temperatura de saída dos gases da linha 2 (K)
TsL3	Temperatura de saída dos gases da linha 3 (K)
u	Velocidade média do vento (m/s)
U1	Taxa de emissão média dos Fornos 1 e 2 (g/s)
U3	Taxa de emissão média do Fornos 3 (g/s)
UL1	Velocidade de saída dos gases da linha 1 (m/s)
UL2	Velocidade de saída dos gases da linha 2 (m/s)
UL3	Velocidade de saída dos gases da linha 3 (m/s)
x	Distância horizontal da fonte (m)
y	Distância horizontal do eixo central da pluma (m)
Wsc	Largura comum as Salas de Cubas (m)

w_s	Velocidade do vento (m/s), utilizado no modelo
z	Altura do da pluma em relação ao solo (m)
Z_1	Altura de medição do vento (estação meteorológica) (m)
σ_y	Coeficiente de dispersão lateral
σ_z	Coeficiente de dispersão vertical
β	Parâmetro empírico do modelo BLP
$d\theta/dz$	Gradiente de temperatura

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema de uma cuba eletrolítica tipo <i>Pre-Baked</i>	6
Figura 2.2 – Esquema de uma cuba eletrolítica tipo <i>Sodeberg</i>	7
Figura 2.3 – Circulação geral dos ventos na atmosfera	9
Figura 2.4 – pluma de dispersão tipo “ <i>looping</i> ” ou serpente	12
Figura 2.5 – pluma de dispersão tipo “ <i>conning</i> ” ou cônica	12
Figura 2.6 – pluma de dispersão tipo “ <i>fanning</i> ” ou tubular	13
Figura 2.7 – pluma de dispersão tipo “ <i>lofting</i> ” ou anti-fumegante	14
Figura 2.8 – pluma de dispersão tipo “ <i>fumigation</i> ” ou fumegante	14
Figura 2.9 – Representação de uma Inversão Térmica	16
Figura 3.1 – Direção paralela do vento em relação a uma sala de cubas	23
Figura 3.2 – Direção perpendicular do vento em relação a uma sala de cubas	24
Figura 3.3 – Fluxograma Simplificado do Algoritmo Proposto	28

Figura 4.1 - Parque industrial da ALUMAR	30
Figura 4.2 – Vista aérea do porto	31
Figura 4.3 - Processo de fabricação de alumina e alumínio	32
Figura 4.4 – Vista aérea da refinaria	33
Figura 4.5 – Vista aérea da redução	34
Figura 4.6 - Modelo de sustentabilidade da Alumar	36
Figura 4.7 - Reator A-398, equipamento de controle ambiental responsável pelo tratamento dos gases das Salas de Cubas	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Classe de Estabilidade de Pasquill	15
Tabela 2.2 – Condições meteorológicas que definem a estabilidade de Pasquill	15
Tabela 4.1 – Padrões de qualidade do ar exigidos pela licença de operação da Alumar	37
Tabela 4.2 – Padrões internacionais de emissões de fluoreto gasoso	37
Tabela 4.3 – Resultados utilizando o modelo CALPUFF	40
Tabela 4.4 – Comparação de resultados CALPUFF x modelo proposto (utilizando as mesmas informações de entrada (anexo 2.0) do modelo CALPUFF no modelo proposto)	40
Tabela 4.5 – Comparação de resultados da estação de Coqueiro com o modelo proposto	42

SUMÁRIO

Objetivo e Motivação	1
1 - Introdução	2
2 - Revisão Bibliográfica	4
2.1 - A Produção de Alumínio e as Emissões de Fluoreto	4
2.2 - O Transporte e a Dispersão de Emissões Atmosféricas	8
2.2.1 - Influência dos Ventos	9
2.2.2 - Influência da Estabilidade Atmosférica	10
2.2.2.1 - Pluma de dispersão tipo “ <i>Looping</i> ” ou Serpente	11
2.2.2.2 - Pluma de dispersão tipo “ <i>Coning</i> ” ou Cônica	12
2.2.2.3 - Pluma de dispersão tipo “ <i>Fanning</i> ” ou Tubular	13
2.2.2.4 - Pluma de dispersão tipo “ <i>Lofting</i> ” ou Anti-Fumegante	13
2.2.2.5 - Pluma de dispersão tipo “ <i>Fumigation</i> ” ou Fumegante	14
2.2.3 - Influência da Inversão Térmica	15
2.2.4 - Influência da Topografia	16
2.3 - Modelagem Matemática da Dispersão de Emissões Atmosféricas	17
2.3.1 - Modelo de Caixa	17
2.3.2 - Modelo de Gauss	17
2.3.3 - Modelos Lagrangianos	18
2.3.4 - Modelos Eulerianos	19
2.3.5 - Modelo de Gás Denso	20
2.4 - O Modelo de Disperção BLP – <i>Buoyant Line and Point Source</i>	21
3.0 - Algoritmo Proposto e Suas Considerações	22

3.1 - Estado Estacionário	22
3.2 - Taxas de Emissões de Fontes Estacionárias	22
3.3 - Condições Meteorológicas	23
3.4 - Cálculo de Concentrações na Altura do Solo	23
3.5 - Direção do vento	23
3.6 - Tipo de Terreno	26
3.7 - Equação da Pluma de Gauss para uma Fonte Pontual	25
3.8 - Equação da Pluma de Gauss para uma Fonte Linear	25
3.9 - Altura da Pluma	26
3.9.1 - Altura da Pluma para Fontes Pontuais com Influência do Vento Vertical	27
3.9.2 - Altura da Pluma para Fontes Lineares com Influência do Vento Vertical	28
3.10 - Fluxograma Simplificado do Algoritmo Proposto	28
4.0 - Estudo de Caso – Avaliação da Dispersão de Fluoreto Gasoso na Alumar	29
4.1 - Apresentação da Alumar	29
4.2 - Descrição do Processo Produtivo	30
4.2.1 - Porto	30
4.2.2 - Descrição do Processo da Refinaria	33
4.2.3 - Descrição do Processo da Redução	34
4.3 - Plano de Monitoramento e Gestão Ambiental da Alumar	35
4.4 - Gerenciamento das Emissões Atmosféricas e Qualidade do Ar da Alumar	37
4.5 - Resultados das Simulações da Qualidade do Ar Utilizando o Algoritmo Proposto	39
4.5.1 - Comparação com Resultados de Simuladores Comerciais	39
4.5.2 - Correlação dos Resultados da Estação de Coqueiro com as Taxas de Emissões	40

4.5.3 - Correlação dos Resultados da Estação de Coqueiro com os Resultados do Modelo Proposto	41
5.0 - Resultados e Discussões	45
6.0 - Conclusões	47
Anexos	
Anexo 1 - Modelagem e Simulação das Emissões de Fluoreto Gasoso de uma Redução Eletrolítica de Alumínio Utilizando o Software <i>Mathcad 11 Enterprise Edition</i>	48
Anexo 2 – Rosa dos Ventos Típica da Região (Rosa de vento - 2002 – 2003, Aeroporto Internacional de São Luís)	64
Anexo 3 – Tabela de Valores de Entrada de Simulação - 2004	66
Anexo 4 – Tabela de Valores de Entrada – Médias Anuais 1999/2006 – e Constantes Utilizadas nas Simulações	68
Referências Bibliográficas	72

Objetivo e Motivação

O monitoramento e gerenciamento da qualidade do ar são quesitos de suma importância na gestão ambiental de qualquer empresa que tenha fontes de emissões atmosféricas instaladas nas suas dependências. No entanto, a simulação de dispersão das emissões atmosféricas, e conseqüentemente a predição da qualidade do ar de forma analítica, é uma prática mais comum de ser realizada quando o empreendimento precisa demonstrar qual será o impacto de novos projetos ou grandes expansões para os órgãos ambientais competentes. Com isso, a existência de um modelo matemático simples, assertivo e de acesso ilimitado por parte dos profissionais de meio ambiente, é de fundamental importância para que possam ser avaliadas, com combinações inesgotáveis, todas as variáveis que impactam na dispersão das emissões: variáveis meteorológicas e qualquer mudança no processo das fontes existentes ou qualquer nova fonte prevista em projetos. Desta forma, o profissional de meio ambiente pode ter uma avaliação abrangente e mais completa sobre o grau de impacto das variáveis em questão, contribuindo de forma mais contundente nas análises críticas de mudança de processo.

O principal objetivo desse estudo é desenvolver um modelo matemático de dispersão atmosférica para as emissões de fluoreto gasoso de uma redução eletrolítica de alumínio. Os objetivos específicos são:

- Descrever os mecanismos envolvidos no transporte das emissões atmosféricas para fontes pontuais (chaminés) e de linha (prédios de salas de cubas);
- Descrever um modelo matemático considerando as características específicas das fontes de emissões da Alumar;
- Implementar o modelo em um software comercial (*Mathcad*) para que possa ser utilizado rotineiramente;
- Simular situações de variações meteorológicas e de processo para validação do modelo e análise crítica.

1. Introdução

A qualidade do ar tem se tornado uma preocupação mais intensa nas últimas décadas em todo o mundo, e com isso tem exigido maior conhecimento dos mecanismos de transporte, e das medidas mitigadoras associadas ao controle de processo e equipamentos de controle de poluição.

A importância do estudo das dispersões atmosféricas tornou-se mais evidente com o aumento das emissões poluentes causadas pelo crescimento das áreas urbanas, incluindo o aumento da frota de veículos, e o crescimento industrial. Outro fator, que tem levado ao estudo sistemático do comportamento da dispersão de poluentes na atmosfera, é a localização física dos grandes centros urbanos e industriais. Em geral estes centros estão localizados em regiões bastante heterogêneas em termos de relevo, tipos de solo e ocupação. Dependendo do grau de variação dessas variáveis a dispersão das emissões torna-se mais difícil de ser caracterizada. Com isso, o entendimento preliminar do impacto dessas variáveis na dispersão dos poluentes é primordial para definição até mesmo da viabilidade de instalação de empreendimentos numa determinada região, especialmente naquelas localizadas nos países em desenvolvimento.

Apesar da literatura relatar vários casos de incidentes, e de movimentos em prol da exigência de leis específicas que protegessem a qualidade do ar, no Brasil somente com a Constituição Federal de 1988 é que esse assunto ficou mais evidente. Posteriormente com a definição da Resolução do CONAMA, número 3, de 1990 é que o Brasil definiu limites para qualidade do ar no território nacional.

A Constituição Federal de 1988 conferiu proteção ao meio ambiente de forma bem abrangente, inclusive no que diz respeito à necessidade do estudo prévio de impacto ambiental e à indenização dos danos causados ao meio ambiente. E a Lei de Política Nacional do Meio Ambiente (Lei 6.938/81) adotou a teoria do “risco da atividade”, criando o regime da responsabilidade civil objetiva pelos danos ambientais causados. Isso significa que o agente poluente, independente de sua conduta ser intencional ou não, tem o dever de indenizar [1].

A principal consequência da “responsabilidade objetiva” é que o dever de reparar o dano existe independentemente de culpa ou dolo. É evidente que para a prevenção do dano ambiental é possível o ajuizamento de qualquer ação, como o mandado de segurança - cautelar ou de conhecimento. E a criação, em 1990, do Código de Defesa do Consumidor ampliou ainda mais a possibilidade de se ajuizar qualquer ação em defesa do direito difuso e coletivo do meio ambiente.

[1]

Anteriormente, no Brasil, a instalação de uma indústria, por exemplo, não levava em consideração as condições meteorológicas do local, e conseqüentemente as condições de dispersões atmosféricas. Sabe-se hoje em dia que a instalação de uma fonte de emissão depende basicamente das características meteorológicas juntamente das características de projeto [2].

Atualmente, a instalação de uma indústria deve passar por um estudo detalhado dos impactos ambientais, incluindo evidentemente a qualidade do ar, e de suas medidas mitigadoras quando necessário [2].

As emissões de poluentes atmosféricos podem classificar-se em [3]:

- Antropogênicas: aquelas provocadas pela ação do homem (indústria, transporte, geração de energia, etc.);
- Naturais: causadas por processos naturais, tais como emissões vulcânicas, processos microbiológicos, etc.

Por outro lado, os poluentes gasosos podem ser classificados em [3]:

- Primários: aqueles lançados diretamente na atmosfera, como resultado de processos industriais, gases de exaustão de motores de combustão interna, etc. Como exemplo, temos os óxidos de enxofre SO_x , os óxidos de nitrogênio NO_x e os particulados.
- Secundários: produto de reações fotoquímicas, que ocorrem na atmosfera entre os poluentes primários. Assim, por exemplo, temos a formação de ozônio de nitrogênio com hidrocarbonetos na atmosfera.

2. Referência Bibliográfica

Neste capítulo é apresentada a referência bibliográfica que descreve a cadeia produtiva do alumínio demonstrando aspectos técnicos da produção, bem como a origem das emissões de fluoreto em uma redução eletrolítica. São descritos também neste capítulo os principais fenômenos responsáveis pela dispersão atmosférica, as principais características de uma pluma de dispersão, os principais tipos de modelos matemáticos aplicados na modelagem de emissões e o detalhamento do modelo utilizado como referência para o trabalho, o BLP - *Buoyant Line and Point Source*.

2.1. A Produção de Alumínio e as Emissões de Fluoreto

Todo alumínio primário é produzido pelo processo *Hall-Héroult*. Este processo consiste basicamente na redução eletrolítica da alumina, dissolvida em um banho de criolita fundida ($3\text{NaF} \cdot \text{AlF}_3$). O banho fica a uma temperatura de aproximadamente $960\text{ }^\circ\text{C}$ [4].

Com a decomposição da alumina, o oxigênio se dirige ao anodo (pólo positivo), e combina com ele, e o alumínio se deposita no fundo da célula eletrolítica (catodo, que é o pólo negativo). A principal reação eletroquímica que acontece no processo é a seguinte:



As etapas envolvidas na produção do alumínio metálico são:

- Instala-se ou substitui-se o revestimento da cuba;
- Fabricam-se os anodos de carbono usados na célula;
- O banho de criolita é preparado e a composição controlada;
- A alumina é dissolvida no banho de criolita e fundida;
- A solução de alumina na criolita fundida é eletrolisada para dar o alumínio metálico. Ela própria funciona como catodo;
- O eletrodo de carbono é oxidado pelo oxigênio liberado;
- O alumínio fundido é sangrado das células, ligado (se for o caso), vazado em lingotes e resfriado.

As cubas eletrolíticas são vasos grandes, em aço, com a forma de um tanque; dentro de cada um deles está o compartimento catódico, revestido por uma mistura de piche e antracito ou

coque, apisoada e recozida no local pela ação de uma corrente elétrica, ou revestido por blocos cimentados, pré-cozidos. Este compartimento, ou cavidade catódica, pode ter uma profundidade de 30 a 50 cm e até 3 a 9 m de comprimento, de acordo com o tipo de cuba e com a amperagem para que está projetada. A espessura do revestimento do compartimento catódico varia de 15 a 25 cm, nos lados, e de 35 a 45 cm, no fundo. Entre o revestimento e o casco de aço, coloca-se uma camada de isolante térmico – tijolos refratários. Na parte do fundo do revestimento da cavidade, estão embutidas grandes barras de aço, que servem de coletoras da corrente e se estendem até aberturas na cuba, por onde fazem contato com a barra ônibus do catodo. O revestimento das cubas dura, normalmente, de 2 até 4 anos. Quando ocorre uma falha, usualmente em virtude da penetração do metal até os coletores do catodo, que ele dissolve, ou graças à penetração do metal até o casco da cuba, de onde ele vaza em torno dos coletores, é preciso substituir todo o revestimento, o isolamento térmico e o conjunto de coletor. A renovação do revestimento da cuba constitui parte apreciável das despesas de produção e inclui não só o custo da mão-de-obra, dos coletores, dos materiais de revestimento e de isolamento térmico, mas também a perda do eletrólito absorvido no revestimento danificado (muitos produtores recuperam, pelo menos parte, o eletrólito que fica no revestimento) [5].

São dois tipos de cuba usados no processo Hall-Héroult, os com anodos múltiplos pré-cozidos, cubas *Pre-Baked* (Fig. 2.1) e os que têm o anodo com auto recozimento, ou anodo *Soderberg* (Fig. 2.2). Em ambos os tipos, os anodos estão suspensos de uma superestrutura, que se estende sobre a cavidade da cuba, e acoplados a uma barra ônibus anódica, de modo a ser possível ajustar a respectiva posição vertical. Os blocos anódicos pré-cozidos são fabricados a partir de uma mistura de coque de petróleo de baixo teor em cinzas, com piche ou alcatrão, prensados numa prensa hidráulica e cozidos até 1.100 °C [5].

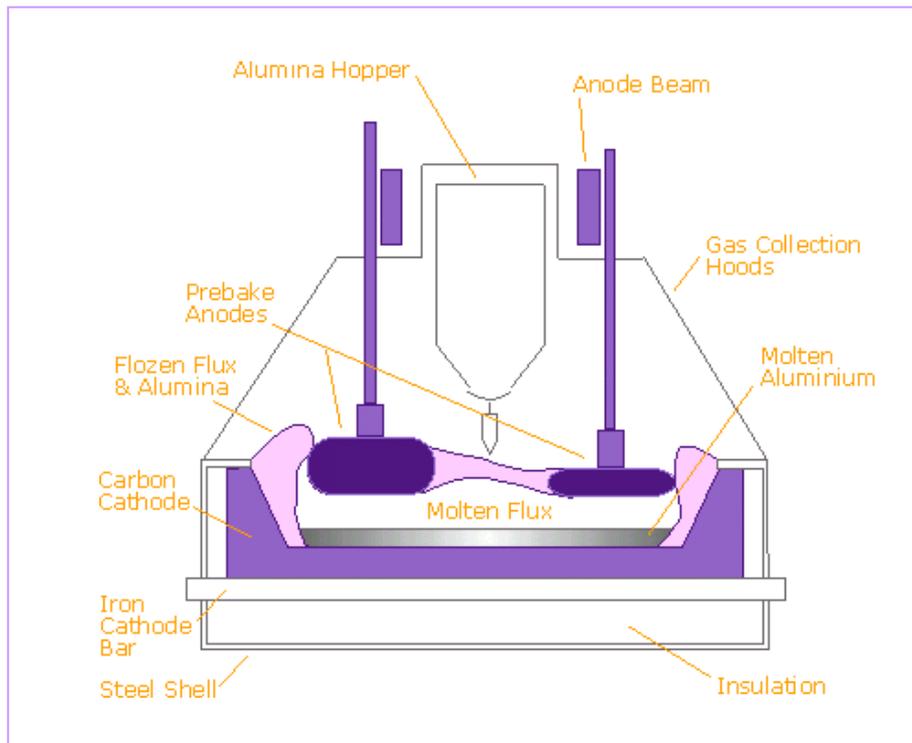


Figura 2.1 – Esquema de uma cuba eletrolítica tipo *Pre-Baked* [7]

As cubas a anodo *Sodeberg* têm um único anodo de dimensões grandes, subtendendo a maior parte da cavidade da cuba. O anodo fica encerrado numa carcaça de aço aberta, com as abas verticais, por onde é imerso no eletrólito. Quando as cubas principiam a operar, a temperatura é elevada até o nível operacional graças ao aquecimento resistivo; os anodos são postos em contato com uma camada de pedaços de coque colocados no fundo da cavidade da célula, e se faz circular a corrente elétrica, na célula em curto-circuito, até chegar-se à temperatura desejada. Os materiais do eletrólito são adicionados à cavidade da célula, em torno dos anodos, e, à medida que vão sendo fundidos, os anodos são levantados para que a cuba comece a operar. Normalmente, a distância anodo-cátodo é cerca de 5 cm. O eletrólito fundido é constituído principalmente de criolita ($3\text{NaF}\cdot\text{AlF}_3$) mais um excesso de AlF_3 , 6 a 10 % ponderais de CaF_2 (fluorita) e de 2 a 6% de Al_2O_3 [5].

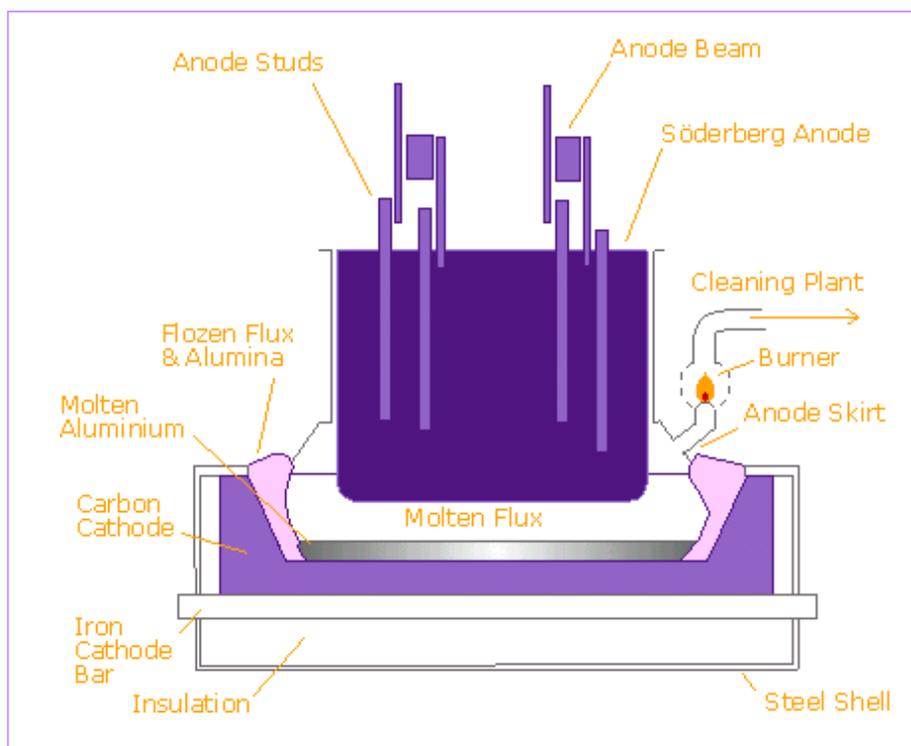
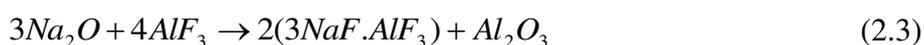


Figura 2.2 – Esquema de uma cuba eletrolítica tipo Sodeberg [7]

O controle da composição do eletrólito é importante no processo de produção do alumínio. O ponto de fusão da criolita pura é 1.009 °C e, por isso, o eletrólito contém fluorita e um certo excesso de AlF_3 , juntamente com a alumina dissolvida, com o que a temperatura do líquido é suficientemente abaixada para permitir a operação das cubas na faixa de 940 a 980 °C. O excesso de AlF_3 também aumenta a eficiência da cuba. A razão NaF/AlF_3 até a faixa de 1,10 a 1,40. Nas primeiras semanas depois de se colocar em operação uma célula recém-revestida, o eletrólito é rapidamente absorvido no revestimento e no isolamento, com a absorção preferencial marcada da parcela em alto teor de sódio, o que tende a torna a razão NaF/AlF_3 inferior ao nível desejado. Compensa-se esta perda pela adição de material alcalino, por exemplo, de barrilha [5]:



Depois das primeiras semanas de operação das cubas, o eletrólito tende a perder o AlF_3 mediante a volatilização dos compostos ricos em AlF_3 e também em virtude da reação com a soda cáustica residual na alumina e da hidrólise no ar ou nos materiais adicionados [5]:



Assumindo que a formação de HF ocorre através da reação de AlF_3 no eletrólito ou vapor com uma fonte de H, a equação (4) descreve a reação [6].



Os fluoretos volatilizados e o fluoreto de hidrogênio são coletados, juntamente com outros gases liberados nas células, por coifas ou dutos coletores e passam para grandes tubos distribuidores, indo para instalações centrais de tratamento e de recuperação dos gases. Para se manter a composição desejada, é preciso compensar a perda destes materiais mediante a adição periódica de AlF_3 ao eletrólito. A pequena percentagem de cal, normalmente presente como impureza na alumina, é suficiente para manter a concentração desejada de fluorita durante a reação [5].

As principais fontes de emissões fugitivas de HF de uma cuba eletrolítica podem ser divididas em três grupos: parâmetros de processo, parâmetros operacionais e manutenção, principalmente quando é necessário abrir as tampas laterais da cuba ou até mesmo romper a crosta solidificada que se forma na superfície do banho eletrolítico [6].

2.2. O Transporte e a Dispersão de Emissões Atmosféricas

A concentração de uma determinada substância na atmosfera varia no tempo e no espaço em função de reações químicas e/ou fotoquímicas, dos fenômenos de transporte, de fatores meteorológicos (ventos, turbulências e inversões térmicas) e da topografia da região.

Para isso, as condições meteorológicas têm um papel determinante na descrição físico-química do transporte de poluentes entre a fonte e o receptor [12]. A seguir é descrita a influência de alguns destes fatores na dispersão atmosférica.

2.2.1. Influência dos Ventos

A velocidade do vento e a sua turbulência têm grande influência sobre a dispersão dos poluentes na atmosfera [3]. A Figura 2.3 mostra a circulação geral dos ventos na atmosfera terrestre. As causas do aparecimento dos ventos são as seguintes:

- Distribuição desigual da energia pelas variações na insolação em diferentes latitudes.
- Forças de Coriolis: na superfície da Terra, um objeto localizado no Equador tem uma velocidade tangencial maior que um outro localizado numa região temperada.

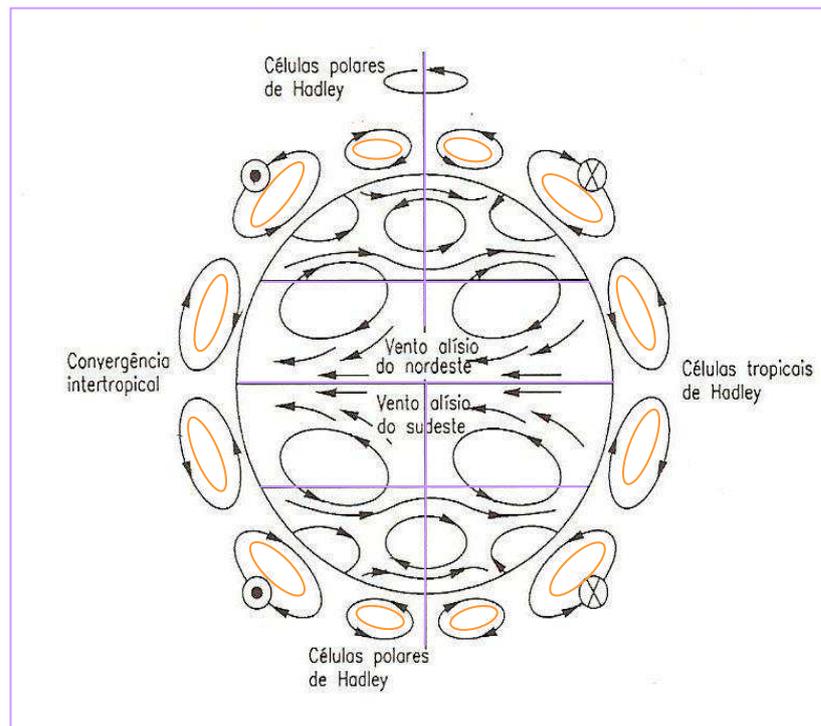


Figura 2.3 – Circulação geral dos ventos na atmosfera [3]

Do ponto de vista da movimentação do ar, a atmosfera divide-se nas seguintes camadas [3]:

- Camada limite planetária: Vai desde a superfície da terra até uma altura de 500m. os fatores que determinam a velocidade e direção do vento nesta camada são: gradiente de pressão horizontal, o esforço de cisalhamento, e a força de coriolis.

- Camada geostrófica: Nesta camada, a velocidade e direção do vento determinam-se só pelo gradiente de pressão horizontal e pela força de coriolis, porquanto não é preciso considerar o efeito da superfície.

A direção inicial do transporte dos poluentes originados de uma fonte é determinada pela direção do vento medido no local da fonte. A concentração de poluentes, originados de fontes pontuais, é provavelmente mais sensível a direção do vento do que qualquer outro parâmetro [2]. Uma mudança de apenas 5^o na direção da velocidade do vento pode causar uma redução de até 90% dependendo da condição da atmosfera, na concentração medida por um receptor alinhado com a direção original [11].

2.2.2. Influência da Estabilidade Atmosférica

A capacidade dispersiva turbulenta da atmosfera é determinada pela energia e tamanho de seus movimentos turbulentos. Esta capacidade é convenientemente descrita como uma propriedade chamada “estabilidade atmosférica” [14].

Em termos simples, a estabilidade da atmosfera é a sua tendência a resistir ou intensificar o movimento vertical, ou alternativamente suprimir ou aumentar a turbulência existente. O grau de turbulência na baixa atmosfera depende fortemente do gradiente vertical de temperatura, embora este seja também influenciado pela rugosidade do terreno, velocidade do vento e efeitos da viscosidade (cisalhamento). Embora não sejam completamente equivalentes os termos “estabilidade atmosférica” e “turbulência atmosférica” são considerados permutáveis em se tratando de difusão atmosférica [12].

A atmosfera é dita muito estável quando há pouco ou nenhum movimento turbulento presente. Tais circunstâncias ocorrem frequentemente, por exemplo, nas noites calmas em que o ar frio cai. Em resfriamento, o ar torna-se mais denso e então é inibido de misturar com o ar mais leve acima. Com a continuação do resfriamento, através da noite, resultará numa camada de centenas de metros. Em tal condição estável, a temperatura pode aumentar com a altura (ao contrário do seu decréscimo durante o dia) produzindo o que é chamado “inversão de temperatura”. O caso particular do caso acima é também chamado de “inversão de radiação” [14].

Uma atmosfera instável é encontrada em dias de sol onde após várias horas de aquecimento a temperatura do ar ao nível do solo torna-se muito maior que a massa de ar acima. O

ar imediatamente torna-se menos denso e levanta-se formando termas discretas. Desta forma, o ar adjacente ao do solo é continuamente misturado até alturas de centenas ou milhares de metros [14].

Condições atmosféricas neutra, caso intermediário entre o estável e instável, ocorre quando o aquecimento e o resfriamento do solo são relativamente fracos [14]. Condições neutras são caracterizadas pela ocorrência de um perfil vertical de temperatura adiabático (aproximadamente constante com a altura). Estas condições ocorrem geralmente durante as transições do dia para noite e vice-versa, em dias nublados, ou com fortes ventos (com velocidades maiores do que 6 m/s) [12].

O comportamento da pluma de dispersão das chaminés é totalmente correlacionado com o tipo de condição atmosférica do momento. Sobre condições estáveis, a pluma dispersa muito vagorosamente e concentrações ao nível do solo podem não ser registradas dentro de uma distância de 5 km ou mais da fonte [14].

Sobre condições neutras, a pluma dispersa com uma taxa moderada sendo que o máximo da concentração registrada ao nível do solo será registrado a poucos quilômetros da fonte.

O comportamento de plumas em condições instáveis é muito errático, a dispersão é rápida e concentrações podem ser registradas ao nível do solo dentro de algumas centenas de metros da fonte [14].

A seguir alguns comportamentos de plumas de dispersão dependendo do tipo de estabilidade:

2.2.2.1. Pluma de dispersão tipo “*Looping*” ou Serpente

Condições instáveis ou convectivas ocorrem durante o dia, com forte entrada de radiação (dias bastante ensolarados). Dissipa-se rapidamente com a distância. Probabilidade elevada de altas concentrações ao nível do solo próxima a fonte emissora. Estas condições proporcionam uma forte mistura vertical dos poluentes provocada por movimentos convectivos organizados gerados pelo aquecimento solar da superfície, Carvalho (1996). Em atmosferas convectivas o aspecto da pluma assume uma forma serpenteando (Fig. 2.4)



Figura 2.4 – pluma de dispersão tipo “*looping*” ou serpente [13]

2.2.2.2. Pluma de dispersão tipo “*Coning*” ou Cônica

Condições atmosféricas neutra, grande probabilidade de contato com o nível do solo após distância mediana da fonte (Fig. 2.5). Dias ensolarados, entretanto nublados (dias de tempestade de verão, comum na primavera ou outono - presença de nuvens cumulus), perfeitamente visíveis ao cair da tarde quando a atmosfera é quase neutra e ventos com intensidade média;

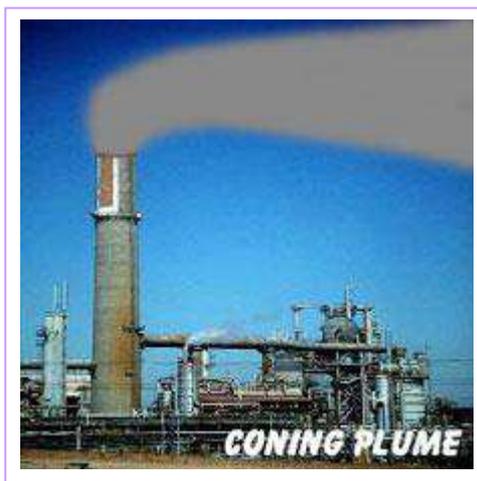


Figura 2.5 – pluma de dispersão tipo “*coning*” ou cônica [13]

2.2.2.3. Pluma de dispersão tipo “*Fanning*” ou Tubular

Grande estabilidade atmosférica, ausência de efeitos mecânicos, ocorre geralmente na noite, entre 1200 m a 1800 m acima da terra. Sob estas condições, com ventos fracos e o poluente pode viajar a grandes distâncias mantendo altas concentrações (Fig. 2.6).

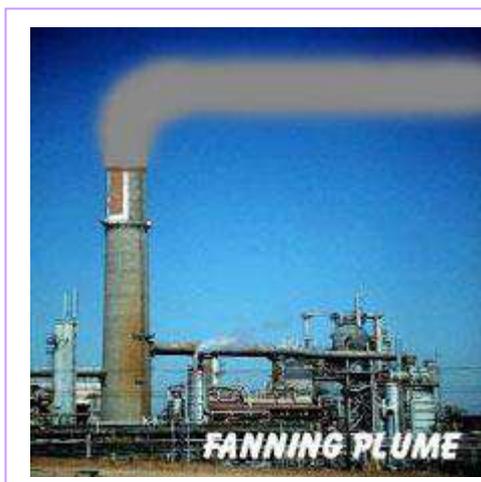


Figura 2.6 – pluma de dispersão tipo “*fanning*” ou tubular [13]

2.2.2.4. Pluma de dispersão tipo “*Lofting*” ou Anti-Fumegante

A pluma possui energia suficiente para atravessar a capa de inversão. A parte inferior da pluma fica aprisionada na parte superior da inversão e a superior da pluma segue difundindo-se (Fig. 2.7). Favorável a baixas concentrações no nível do solo. São criadas quando a condição é instável acima da pluma e estável abaixo. Acontece tipicamente no entardecer.

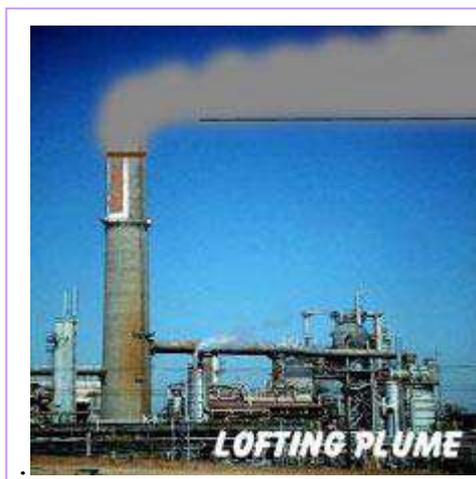


Figura 2.7 – pluma de dispersão tipo “*lofting*” ou anti-fumegante [13]

2.2.2.5. Pluma de dispersão tipo “*Fumigation*” ou Fumegante

Ocorre quando a pluma fica aprisionada em uma capa de inversão na qual está capa se rompe pela parte inferior, deixando livre a pluma (Fig. 2.8). Elevados teores de concentração são encontrados próximos a fonte, por isso caracteriza-se como sendo a mais perigosa das plumas. Típico das primeiras horas após a saída do sol, que provoca instabilidade junto ao solo (após uma noite com inversão ou grande estabilidade).

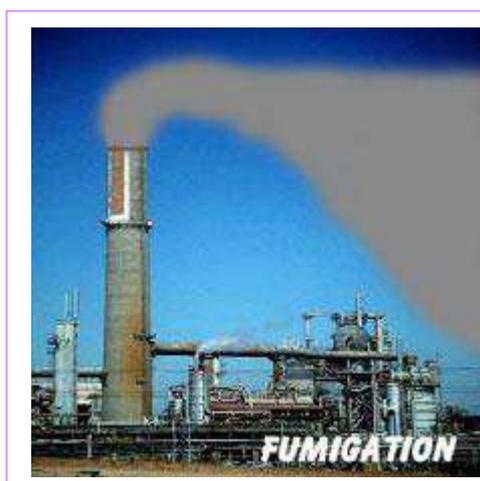


Figura 2.8 – pluma de dispersão tipo “*fumigation*” ou fumegante [13]

O método mais comum para caracterizar a estabilidade atmosférica, e a turbulência existente presente, foi desenvolvido por Pasquill em 1961. Ele caracterizou a turbulência

atmosférica em seis classes chamadas classes A, B, C, D, E e F, sendo a classe sendo a mais instável e turbulenta, e F a mais estável e menos turbulenta. A Tabela 2.1 lista as seis classes e na Tabela 2.2 prover as condições meteorológicas que defini cada classe.

Tabela 2.1 – Classe de estabilidade de Pasquill

Estabilidade da Classe	Definição		Estabilidade da Classe	Definição
A	Muito instável		D	Neutra
B	Instável		E	Levemente estável
C	Levemente instável		F	Estável

Tabela 2. 2 – Condições meteorológicas que definem a estabilidade de Pasquill

Velocidade Superficial		Dia – Radiação Solar Incidente			Noite	
m/s	mi/h	Forte	Moderado	Leve	> 50%	< 50%
< 2	< 5	A	A – B	B	E	F
2 – 3	5 – 7	A – B	B	C	E	F
3 – 5	7 – 11	B	B – C	C	D	E
5 – 6	11 – 13	C	C – D	D	D	D
> 6	> 13	C	D	D	D	D

2.2.3. Influência da Inversão Térmica

Os problemas de dispersão de poluentes tornam-se mais críticos durante o inverno, quando a ocorrência de inversões térmicas é mais frequente. Durante uma inversão os poluentes ficam aprisionados numa região próxima ao solo, em uma camada de ar estável altamente estratificada que dificulta a dispersão, aumentando sensivelmente a concentração dos contaminantes. Este fenômeno é comum em manhãs frias de inverno com pouco vento e muitas nuvens [18].

As condições meteorológicas podem causar uma inversão no esquema normal de variação da temperatura na troposfera. O resultado é a formação de uma “capa de inversão”. O efeito resultante é a colocação de uma massa de ar frio por baixo de outra de ar mais quente (Fig. 2.9). A presença de uma capa de inversão impede a circulação atmosférica vertical, já que o ar mais frio não pode acender através da capa quente de inversão. Os contaminantes lançados no ar são confinados na capa inferior da inversão. Estas situações podem permanecer invariáveis durante dias, até que as condições atmosféricas mudem e a capa de inversão se destrua [12].

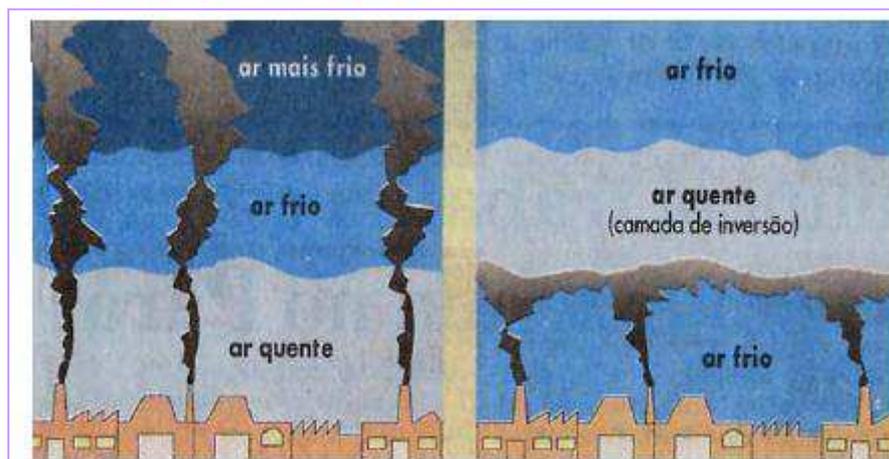


Figura 2.9 – Representação de uma Inversão Térmica [12]

2.2.4. Influência da Topografia

Variações topográficas na configuração da superfície afetam tanto a linha central da trajetória como a difusão da pluma de uma fonte [15]. A linha central da trajetória pode ser fortemente distorcida e ter direções completamente diferentes da direção do vento acima da superfície. Este é geralmente o caso das regiões de vale. O efeito da topografia na difusão da pluma é determinado por características localizadas de configurações da superfície [15].

A topografia complexa influencia a trajetória e a difusão da pluma. Embora ocorram altas concentrações de poluentes em terreno complexo, como por exemplo, na situação em que uma pluma intercepta uma montanha, muitos processos físicos agem no sentido de reduzir as concentrações.

Os terrenos planos são aqueles sem nenhum tipo de elevação na vertical, ou com elevações que não influenciam significativamente o escoamento ao seu redor, gerando recirculações. Já os

terrenos complexos são aqueles onde elevações verticais são significativas a ponto de influenciar o escoamento atmosférico ao seu redor, gerando recirculações. As principais situações que podem aumentar as concentrações em terreno complexo são: encontro da pluma com montanhas, acúmulo de poluentes em vales, arrasto dos poluentes para centros urbanos devido ao fenômeno da canalização do vento pelos vales [16].

2.3. Modelagem Matemática da Dispersão de Emissões Atmosféricas

Existem cinco principais tipos de modelos de dispersão atmosférica, bem como alguns híbridos dos cinco tipos:

2.3.1. Modelo de Caixa

O modelo de caixa é o mais simples dos tipos de modelo. Supõe que um volume dado do ar atmosférico em uma região geográfica está na forma de uma caixa. Supõe também que os poluentes do ar dentro da caixa estão distribuídos de forma homogênea e com isso usa essa suposição para estimar as concentrações médias do poluente em qualquer lugar dentro do caixa. Embora útil, este modelo é muito limitado em sua habilidade de prever exatamente que a dispersão do excesso dos poluentes porque a suposição da distribuição homogênea do poluente é muito demasiadamente simples.

2.3.2. Modelo de Gauss

Talvez este seja o modelo mais velho e também o mais usado dos modelos de dispersão atmosférica [9]. Supõe que a dispersão do poluente do ar tem uma distribuição gaussiana, significando que a distribuição do poluente tem uma distribuição normal da probabilidade. Os modelos gaussianos são os mais usados frequentemente para prever a dispersão das plumas contínuas que originam do nível do solo ou de fontes elevadas. Os modelos gaussianos podem também ser usados prever a dispersão das plumas não-contínuas da poluição de ar (chamados modelos *puff*).

O modelo de pluma gaussiana pode ser derivado da equação de difusão-advecção em situações idealizadas. As concentrações são calculadas a partir da seguinte equação:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi * u * \sigma_y * \sigma_z} * \exp\left(\frac{-y^2}{2 * \sigma_y^2}\right) * \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2 * \sigma_z^2}\right) + \alpha * \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2 * \sigma_z^2}\right) \right] \quad (5)$$

onde $C(x,y,z)$ é a concentração do poluente à sotavento da fonte no ponto (x,y,z) , x a distância horizontal da fonte, y a distância horizontal do eixo central da pluma, z altura do solo, Q vazão mássica de emissão (vazão de lançamento do gás), u velocidade média do vento, H altura efetiva da chaminé, α coeficiente de reflexão σ_y o coeficiente de dispersão lateral e σ_z o coeficiente de dispersão vertical. Estes coeficientes são dependentes da estrutura turbulenta da atmosfera. O modelo gaussiano é baseado em uma fórmula simples que descreve um campo de concentrações tri-dimensional gerado por uma fonte pontual elevada sob condições meteorológicas constantes. As condições de emissão também são consideradas como sendo constantes neste tipo de modelo. Os modelos de pluma gaussiana são largamente utilizados, mas tem muitas limitações físicas. Uma delas é que o terreno deve ser considerado plano. Eles são utilizados com frequência na previsão de concentrações de contaminantes abandonados na camada limite planetária (CLP). Normalmente, em casos práticos de cálculo de concentração, a aproximação gaussiana incorpora parâmetros de dispersão associados às classes de estabilidade. O problema básico com estes esquemas simples de quantificação da turbulência é que eles abrangem uma faixa muito grande de condições de estabilidade [2].

2.3.3. Modelos Lagrangeanos

No esquema lagrangeano formula-se um modelo de trajetórias para o movimento das partículas de fluido. O elemento ou partícula de um fluido é um pequeno volume de controle que viaja na velocidade local do meio fluido. A sua dimensão é grande quando comparada com as escalas moleculares e pequena em relação a menor escala de movimento, a microescala de Kolmogorov. As partículas movem-se seguindo os vórtices turbulentos, descrevendo trajetórias aleatórias, Carvalho (1999). A equação lagrangeana fundamental para a dispersão atmosférica de uma única espécie de poluente é dada por [2]:

$$C(x,t) = \int_0^t \int P(x,t/x',t') S(x',t') dx' dt' \quad (6)$$

Onde: $C(x,t)$ é a concentração média em x no tempo t , $S(x',t')$ é o termo fonte, $P(x,t / x',t')$ é a função densidade de probabilidade (PDF) das partículas, que representa a probabilidade de uma partícula de fluido que estava em x' no tempo t' alcançar x no tempo t . A equação (6) representa uma descrição rigorosa dos processos de transporte e de difusão expressa em uma notação probabilística, onde o parâmetro chave é a PDF. Para determinar a PDF é necessário liberar um número de partículas suficientemente grande, seguir suas trajetórias e calcular quantas delas alcançam a vizinhança de 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]. Segundo Zannetti (1990), vários tipos de modelos podem ser classificados como lagrangeanos. Entre eles então os modelos de caixa lagrangeanos, de pluma gaussiana-segmentada, modelos de puff gaussianos e modelos de partículas lagrangeanos. Os modelos lagrangeanos de partículas são ferramentas cada vez mais utilizadas hoje em dia no estudo do transporte e dispersão de poluentes, e representam o estado da arte em termos de dispersão atmosférica. Estes modelos são baseados na equação generalizada de Langevin. A posição de cada partícula, em cada passo de tempo é obtida pela integração numérica das seguintes equações [2]:

$$du_i = a(x_i, u_i, t)dt + b(x_i, u_i, t)dn \quad (7)$$

$$\frac{dx_i}{dt} = u_i \quad (8)$$

Onde: u_i é a velocidade das partículas, x_i a variável espacial, t o tempo de dn uma variável randômica. O primeiro termo do lado direito da equação (7) é um termo determinístico representando o arrasto viscoso do escoamento sobre as partículas e o segundo um termo estocástico representando acelerações randômicas causadas por flutuações de pressão [2].

2.3.4. Modelos Eulerianos

Um modelo euleriano das dispersões é similar a um modelo lagrangeano que segue também o movimento de um grande número pacotes do plume da poluição enquanto se movem de sua posição inicial. A diferença mais importante entre os dois modelos é que o modelo euleriano usa uma grade cartesiana tridimensional fixa como referência [8]. Na modelagem euleriana, a

dispersão é estudada em termos de uma equação diferencial parcial para a conservação da massa da substância considerada, sendo resolvida em uma malha (grade) fixa no tempo e no espaço. Elas fornecem valores médios de concentração, para os poluentes considerados, em um ponto no espaço. A partir das equações de conservação é possível obter um modelo matemático da dispersão de uma fonte, dadas as apropriadas condições iniciais e de contorno, e dos coeficientes de difusão [2]. O transporte e a dispersão de contaminantes na baixa atmosfera, normalmente, são simulados em termos da equação difusão-advectação, euleriana, que é dada por: [10]:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} + V \frac{\partial c}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + S \quad (8)$$

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

O modelo usa um esquema de diferenças finitas avançado no tempo e no espaço para os termos de advectação. Os de difusão são resolvidos com um esquema semi-implícito centrado com um peso de 75% para a parte da função do tempo avançado.

A estabilidade do modelo é determinada pelos números de *Courant* advectivo e difusivo, dados respectivamente por:

$$C_{adv} = U \frac{\Delta T}{\Delta X} \quad (11)$$

$$C_{dif} = K_z \frac{\Delta T}{\Delta Z^2} \quad (12)$$

2.3.5. Modelo de Gás Denso

Modelos de gás denso são modelos que simulam a dispersão de plumas de gás denso (plumas de poluentes mais pensados que o ar). Esses modelos são usados principalmente para prever simular concentrações de dispersões de vazamentos súbitos. Os três comumente mais usados são [8]:

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

2.4. O Modelo de Dispersão BLP – *Buoyant Line and Point Source*

BLP é um modelo de dispersão gaussiano e foi desenvolvido pela *Environmental Research & Technology Inc.* para simular o transporte e a difusão das emissões provenientes de uma planta de redução eletrolítica de alumínio. Ele pode ser usado em áreas planas e áreas rurais dentro de um raio de 50Km de distância e pode simular 50 fontes pontuais e 10 fontes tipo linhas paralelas. Plantas de alumínio são complexos de fontes de emissões de linhas paralelas chamadas “salas de cubas” intercaladas por fontes pontuais (reatores de tratamento de gás). Existem, tipicamente, 2 a 20 fontes pontuais, para cada sistema de controle de emissões de sala de cubas (reatores). A complexidade de uma planta de alumínio exige que novas técnicas sejam desenvolvidas especificamente para esta necessidade.

Como descrito anteriormente, o modelo BLP calcula as concentrações do ar ambiente, de fontes lineares e pontuais múltiplas, baseado na equação da pluma de Gauss. Ajustes para o efeito do limite de mistura (camada limite planetária), e opcionalmente, decaimento do poluente, precipitação e características do terreno. Para as fontes de linha, a equação da pluma de Gauss para fontes pontuais, é numericamente integrada para todo o comprimento da linha.

As características principais do modelo BLP estão descritas a baixo:

- Sistemas de coordenadas em UTM
- Capacidade para múltiplas fontes de linha e pontuais simultaneamente
- Altura de pluma de fonte linear finita
- Influência de vento vertical na formulação da altura de plumas de fontes lineares e pontuais
- Influência da pluma em função da multiplicidade de outras fontes
- Altura de pluma transacional

- Influência de prédios laterais na formulação da dispersão e do cálculo da altura de plumas (efeito *downwash*) para fontes lineares e pontuais
- Influência da topografia
- Decaimento em função do tempo

3. Algoritmo Proposto e Suas Considerações

O algoritmo proposto (anexo1) neste trabalho foi baseado basicamente no modelo de dispersão BLP – *Buoyant Line and Point Source*, descrito previamente no capítulo 2, e implementado no *Mathcad*. Neste capítulo são apresentadas todas as equações que descrevem a dispersão de fontes pontuais e de linha, bem como todas as considerações e simplificações feitas pelo autor.

3.1. Estado Estacionário

O modelo BLP pode ser implementado tanto no estado transiente como no estado estacionário. No presente trabalho o modelo proposto realiza todas as simulações no estado estacionário. Ou seja: todas as entradas de dados são médias de variáveis num período limitado, não sendo influenciadas pela variável tempo.

Como descrito no capítulo 5, o modelo BLP calcula as concentrações do ar ambiente, de fontes lineares e pontuais múltiplas, baseado na equação da pluma de Gauss. Desta forma o modelo implementado, tipo Gauss, além de considerar o estado estacionário, não considerou o fator de decaimento do poluente e precipitação pluviométrica.

3.2. Taxas de Emissões de Fontes Estacionárias

Como na maioria das reduções eletrolíticas mais de 95% das emissões de fluoreto gasoso são provenientes das salas de cubas e fornos de cozimento (quando reduções de tecnologia tipo Sodeberg), não será considerada a taxa de emissões dos reatores de tratamento de gás. Isso implicaria em uma implementação significativa do algoritmo, ficando este como uma proposta para um trabalho futuro.

3.3. Condições Meteorológicas

O algoritmo proposto considera três classes de estabilidades meteorológicas: instável, neutra e estável. Sendo considerados como médias do período em consideração os valores de velocidade (m/s) e temperatura ambiente (K).

3.4. Cálculo de Concentrações na Altura do Solo

O presente trabalho considera os resultados de concentrações calculados na altura do solo, ou seja: a coordenada z (altura) será zero. A equação utilizada para calcular as concentrações na coordenada desejada é a mesma já descrita no capítulo 6 apresentada como a equação básica da pluma de Gauss. Com z igual a zero a equação implementada será a equação 14.

3.5. Direção do vento

A direção do vento influencia diretamente a altura da pluma nas salas de cubas e é variável importante na elaboração do modelo. No modelo BLP existem duas opções de entrada de dados, informando se a direção do vento é paralela (Fig. 3.1) ou perpendicular (Fig. 3.2) aos prédios de salas de cubas. No modelo proposto, foi considerada somente a condição de direção paralela.

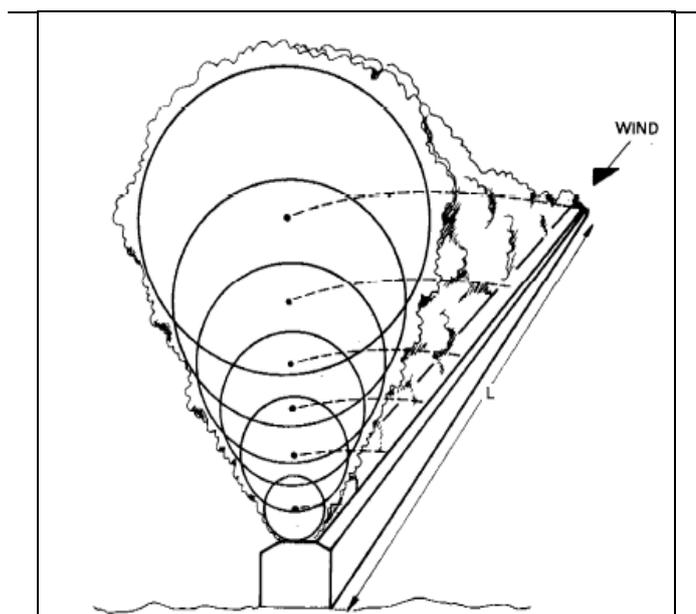


Figura 3.1 – Direção paralela do vento em relação a uma sala de cubas [17]

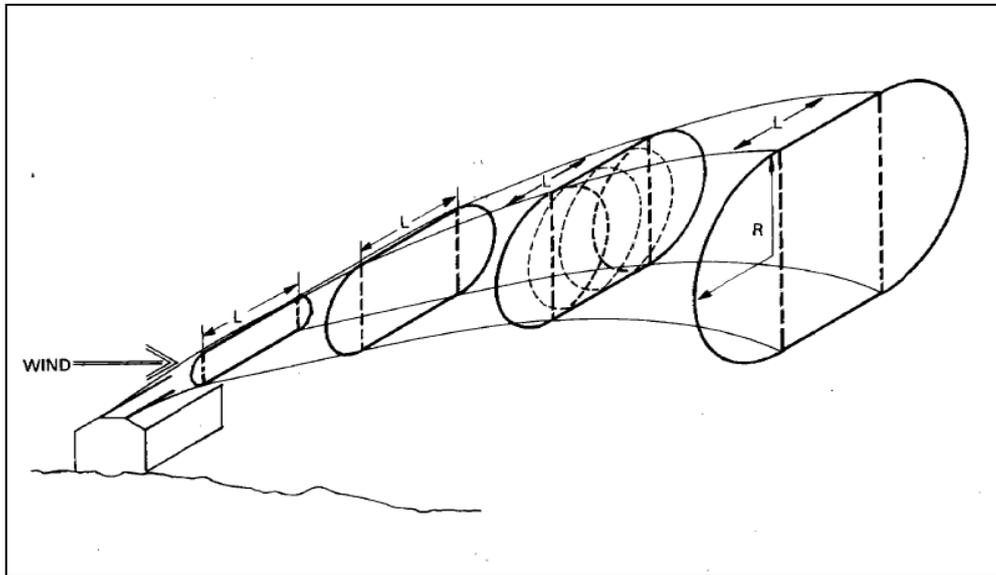


Figura 3.2 – Direção perpendicular do vento em relação a uma sala de cubas [17]

3.6. Tipo de Terreno

Foi visto no capítulo 3 que as variações topográficas na configuração da superfície afetam tanto a linha central da trajetória como a difusão da pluma de uma fonte. Como o objetivo do trabalho é desenvolver um modelo que possa ser utilizado para avaliação de áreas circunvizinhas às reduções eletrolíticas, distância tão próxima que pode ser considerada plana, o tipo de terreno foi considerado como plano, ou seja: Os terrenos planos são aqueles sem nenhum tipo de elevação na vertical, ou com elevações que não influenciam significativamente o escoamento ao seu redor, gerando recirculações.

3.7. Equação da Pluma de Gauss para uma Fonte Pontual

A equação básica de pluma de Gauss é dada por:

$$C(x, y, z) = \frac{Q}{2\pi * u * \sigma_y * \sigma_z} * \exp\left(\frac{-y^2}{2 * \sigma_y^2}\right) * \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2 * \sigma_z^2}\right) + \alpha * \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2 * \sigma_z^2}\right) \right] \quad (3.1)$$

Para concentrações no nível do solo, onde: $z = 0$ temos:

$$C(x, y, 0) = \frac{Q}{2\pi * u * \sigma_y * \sigma_z} * \exp\left(\frac{-y^2}{2 * \sigma_y^2}\right) * \exp\left(\frac{-H^2}{2 * \sigma_z^2}\right) \quad (3.2)$$

onde:

$C(x, y, 0)$ - é a concentração no nível do solo (g/m³)

y - é a distância lateral da pluma em relação a fonte (m)

Q - taxa de emissão da fonte (g/s)

u - velocidade média do vento na altura da chaminé (m/s)

σ_y - coeficiente de dispersão horizontal (m)

σ_z - coeficiente de dispersão vertical (m)

Os coeficientes de dispersão, σ_z e σ_y , usados no BLP são ajustados pontualmente de acordo com a estabilidade atmosférica e a distância da fonte dependendo das curvas de Turner (1970). A altura efetiva da chaminé, H , é a soma da altura física da chaminé, H_s , e a altura da pluma Δh . u é a velocidade média do vento, na altura da chaminé.

3.8. Equação da Pluma de Gauss para uma Fonte Linear

Para calcular concentrações devido a emissões de fontes lineares, o modelo BLP integra numericamente a equação de Gauss para fontes pontuais sobre um comprimento finito da linha.

$$X = \frac{ql}{u} \int_0^L g dl \quad (3.3)$$

onde:

ql - é a taxa de emissão por comprimento da linha (g/s.l)

g - é a função dispersão (m^2)

u - velocidade média do vento na altura da chaminé (m/s)

A função dispersão, g , consiste dos termos relacionados aos coeficientes de dispersão lateral e horizontal da equação da pluma de Gauss para fontes pontuais. Para condições estáveis, ou para uma altura de mistura (CLP) maior que 5.000m,

$$g = \frac{1}{\pi * \sigma_y * \sigma_z} * \exp\left(\frac{-y^2}{2 * \sigma_y^2}\right) * \exp\left(\frac{-H^2}{2 * \sigma_z^2}\right) \quad (3.4)$$

3.9. Altura da Pluma

O modelo BLP usa um ajuste das equações de pluma desenvolvidas para incorporar as influências dos ventos verticais e precipitação na altura da pluma.

Estudos em fontes pontuais e em fontes lineares indicam que a altura da pluma em fontes pontuais ou lineares instaladas próximas é significativamente diferente quando analisadas isoladamente. Plumas de fontes lineares tendem a subir mais alto quando o vento está alinhado ao eixo (comprimento) da fonte do que quando o vento está perpendicular. Fontes lineares são suscetíveis ao *downwash* de prédios, no qual tendem a reduzir a altura da pluma. O vento vertical é importante para esse tipo de fonte.

As equações desenvolvidas para definir a altura da pluma para fontes pontuais não são adequadas para representar a altura da pluma de fontes lineares. Uma nova abordagem para definição da altura da pluma para este tipo de fonte foi desenvolvida para o modelo BLP.

3.9.1. Altura da Pluma para Fontes Pontuais com Influência do Vento Vertical

A velocidade média do vento, u , medido na altura, $z1$, deve ser especificada na entrada de dado. No entanto ela pode ser corrigida em função da variação sofrida com a altura da chaminé (cálculo da velocidade na altura da chaminé) seguindo a lei do poder:

$$u_z = u \left(\frac{z}{z1} \right)^P \quad (3.5)$$

onde:

u_z - é velocidade calculada na altura da chaminé (g/s.l)

P - é a estabilidade

u - velocidade média do vento na altura $z1$

$z1$ - altura da estação meteorológica

Para condições estáveis (classe E e F) é proposta a seguinte equação:

$$Z' = \left(\frac{2(3+P)Z_s^P P}{\beta^2 * U_s * s} \right)^{1/(3+P)} \quad (3.6)$$

$$s = \frac{g}{Ta} * \frac{\partial \theta}{\partial Z} \quad (3.7)$$

onde:

$\frac{\partial \theta}{\partial Z}$ - gradiente de temperatura potencial vertical ($^{\circ}\text{K/m}$)

S – parâmetro de estabilidade

3.9.2. Altura da Pluma para Fontes Lineares com Influência do Vento Vertical

Para condições estáveis a equação que defini a altura da pluma de uma fonte linear, com influência de ventos vertical, é dada por:

$$Z' = \left(\frac{(2+P)Z_s^P F'}{\beta * L * U_s * s} \right)^{1/(2+P)} \quad (3.8)$$

3.10. Fluxograma Simplificado do Algoritmo Proposto

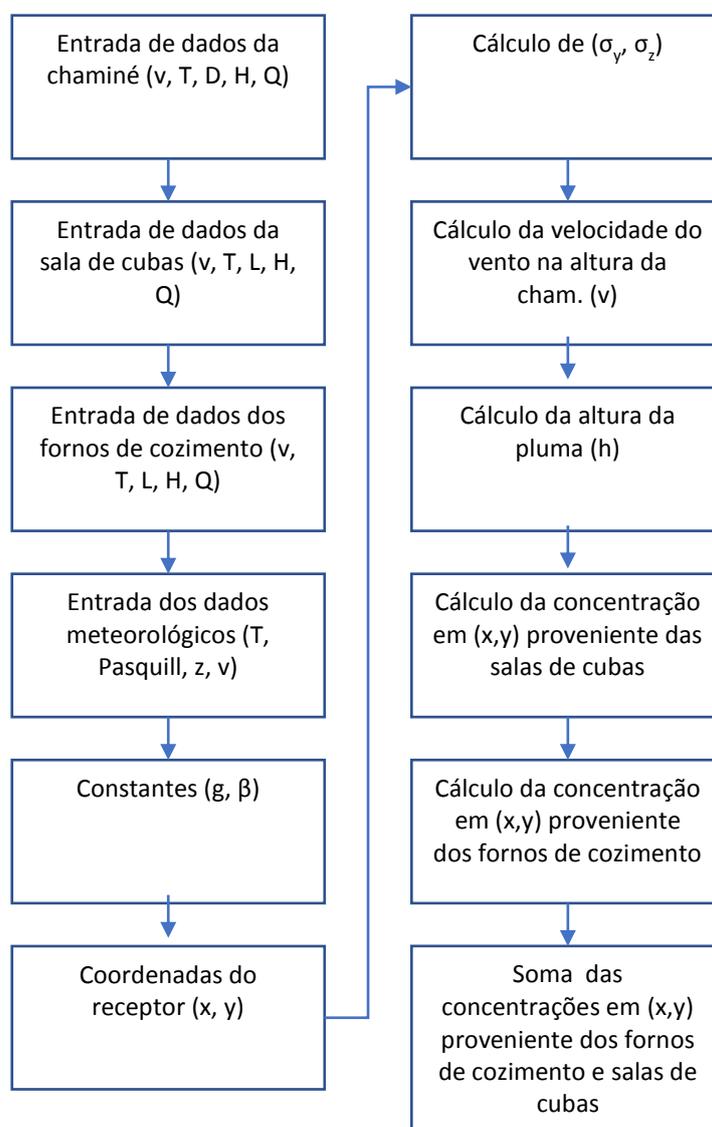


Figura 3.3 – Fluxograma Simplificado do Algoritmo Proposto [Autor]

4. Estudo de Caso – Avaliação da Dispersão de Fluoreto Gasoso na Alumar

Neste capítulo é apresentada a planta da Alumar que foi utilizada como referência para aplicação prática do modelo. Desta forma, o capítulo descreve o processo produtivo da fábrica, as características e dados das suas fontes de emissões de fluoreto gasoso, localização das fontes, localização das estações da qualidade do ar e um resumo do sistema de gestão ambiental da empresa englobando a gestão e monitoramento das suas emissões atmosféricas.

4.1. Apresentação da Alumar

O Consócio de Alumínio do Maranhão - Alumar (Fig. 4.1), em operação desde 1984, é formado pelas empresas ALCOA Alumínio, BHPBilliton, ALCAN Alumínio do Brasil e ABALCO. A Alumar constitui um dos maiores complexos integrados de alumina e alumínio do mundo.

A Refinaria da Alumar produz atualmente cerca de 1,5 milhões de toneladas/ano de alumina e a Redução 447 mil toneladas/ano de alumínio.

Assumindo que a indústria deve ser parte ativa no esforço e na contribuição para a melhoria da qualidade de vida de seus funcionários e da comunidade onde desenvolve suas atividades produtivas, a Alumar opera dentro dos mais modernos conceitos de proteção e controle ambiental. Suas atividades são orientadas por uma visão global de proteção do ar, das águas, do solo, da vegetação e demais recursos e habitats naturais.

Para atingir esses objetivos, a Alumar implantou um moderno e abrangente programa de gerenciamento ambiental, cuja execução é baseada numa rigorosa política ambiental e na ação do homem para sua implantação.

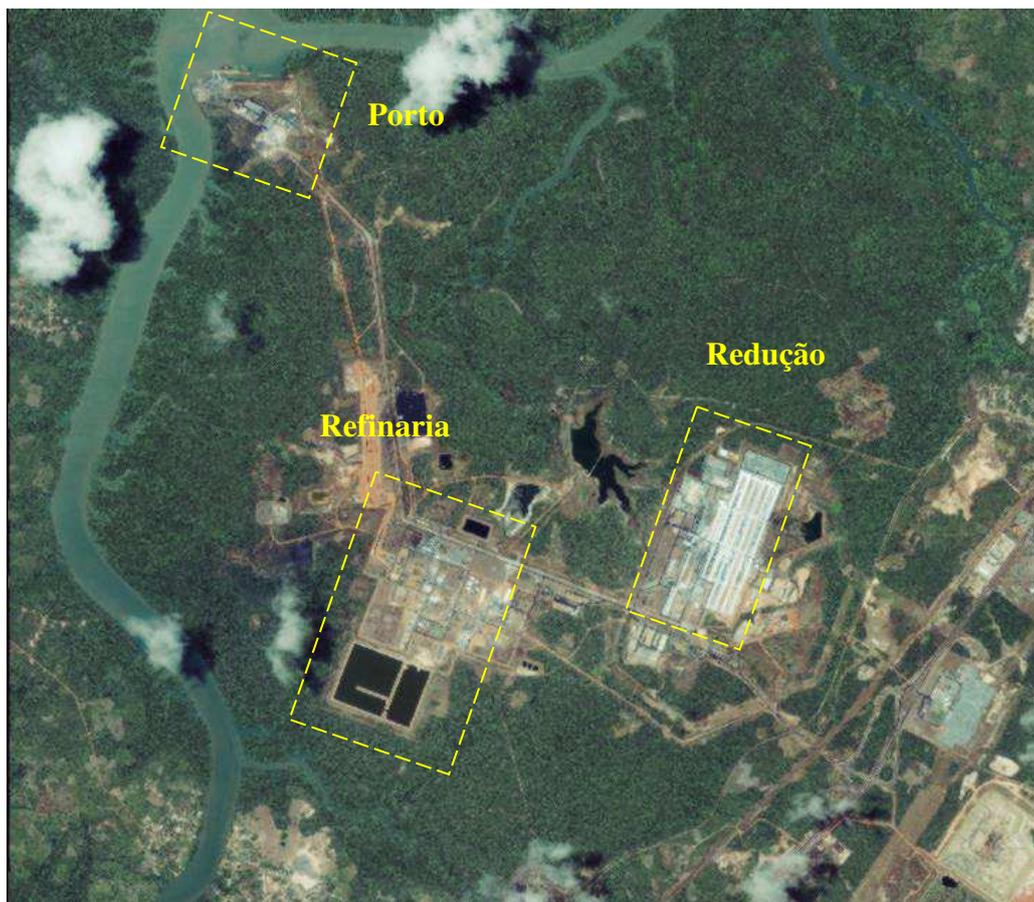


Figura 4.1 - Parque industrial da Alumar [20]

4.2. Descrição do Processo Produtivo

O Parque Industrial da Alumar é um sistema integrado formado pelas áreas do Porto, Refinaria e Redução, constituindo o processo de produção de alumina e alumínio (Fig 4.3).

4.2.1. Porto

O porto da ALUMAR (Fig. 4.2) encontra-se na confluência do Estreito dos Coqueiros com o Rio dos Cachorros e pode receber navios de até 50 mil toneladas de matérias-primas para a fabricação de alumina e alumínio, tais como: bauxita, carvão, coque, piche e soda cáustica.

São, ao todo, três sistemas de manuseio de carga: um para a descarga de bauxita, carvão, coque e piche, e outro para a descarga de soda cáustica, além de um carregador de alumina. Todos os insumos, exceto a soda cáustica, são levados para descarga aos respectivos locais de estocagem

por meio de correias transportadoras. O mesmo acontece com a alumina excedente, que é enviada da fábrica para um silo de estocagem, com capacidade para cem mil toneladas.

Todas as operações de carga e descarga são realizadas dentro dos mais rigorosos critérios de segurança e proteção ambiental, evitando incidentes e a contaminação da água. Esses critérios também são adotados nas áreas de estocagem de soda cáustica, bauxita e carvão que, além disso, são impermeabilizadas e dotadas de sistemas de contenção.

Os principais resíduos gerados no processo do Porto são: água de lavagem das correias transportadoras, bauxita, carvão, coque, piche e alumina.



Figura 4.2 – Vista aérea do porto [20]

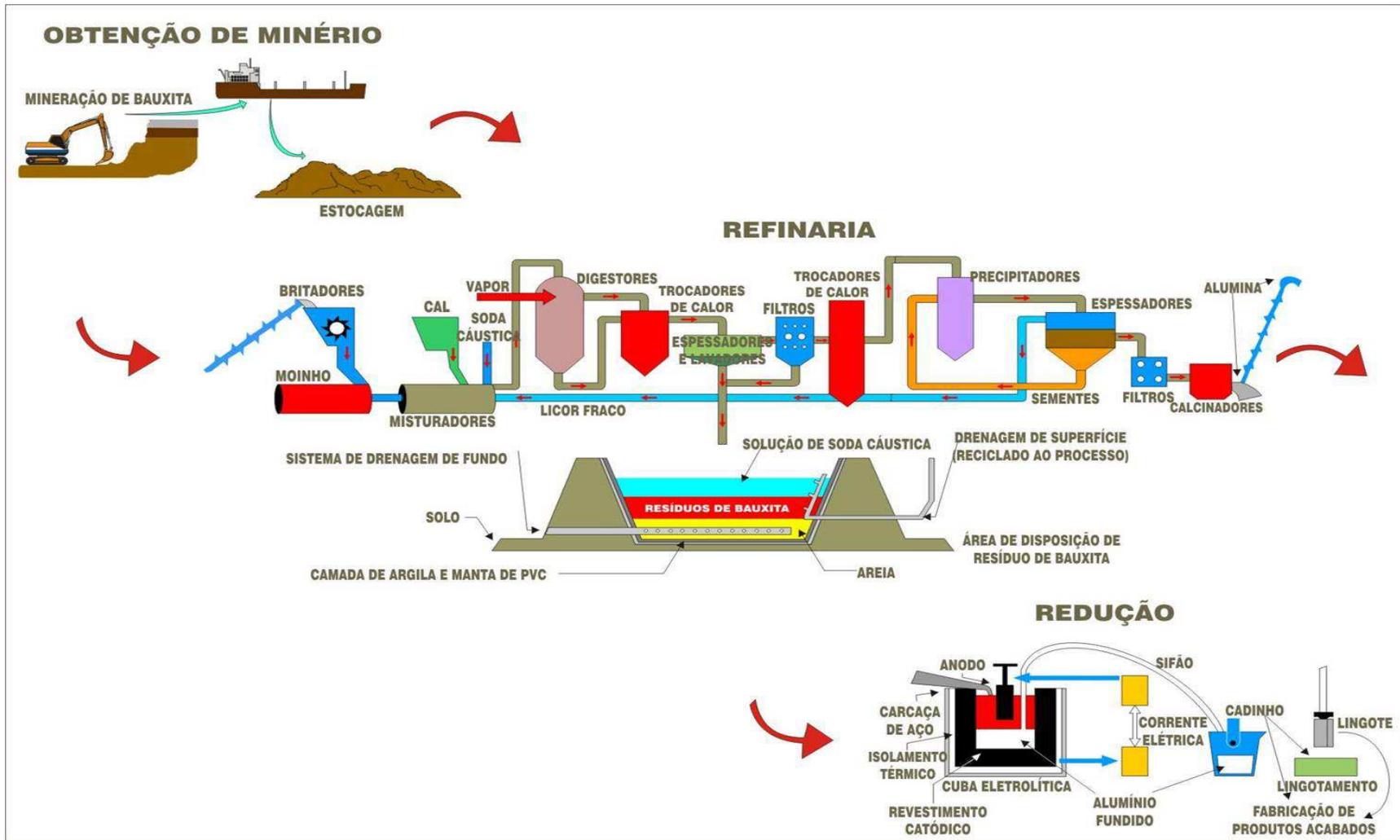


Figura 4.3 - Processo de fabricação de alumina e alumínio [20]

4.2.2. Descrição do Processo da Refinaria

A refinaria (Fig. 4.4) tem como objetivo transformar o minério bauxita em alumina, por meio dos processos de moagem, clarificação, digestão, precipitação e calcinação.

A extração de alumina da bauxita se dá por um processo hidrometalúrgico - Processo Bayer, pelo qual a bauxita é misturada com uma solução de soda cáustica, moída, transformando-se em pasta, e então enviada à digestão. Depois, é aquecida em vasos de alta pressão, proporcionando a dissolução da alumina. A separação das impurezas ocorre por meio de sedimentação e filtração, sendo removido, assim, o resíduo de bauxita. Este hidrato é calcinado a alta temperatura - $1000\text{ }^{\circ}\text{C}$, obtendo-se a alumina. A alumina pode ser embarcada e comercializada pelos membros do consórcio ou enviada à Redução, para ser transformada em alumínio.

Nos processos para a obtenção da alumina, são gerados diversos resíduos: cinzas, gases das caldeiras, crosta dos lavadores, resíduos de bauxita, panos de filtro, hidrato e gases da calcinação, sendo considerado o principal, o resíduo da bauxita, por ainda conter soda cáustica e por seu volume de geração.



Figura 4.4 – Vista aérea da refinaria [20]

4.2.3. Descrição do Processo da Redução

A área de redução da Alumar (Fig. 4.5) é composta, basicamente pelas áreas de eletrodos (anodos verdes, cozimento de anodos e chumbamento de hastes), salas de cubas e lingotamento.

O processo convencional de produção de alumínio consiste na dissolução eletrolítica da alumina em banho eletrolítico fundido, por onde passa uma corrente elétrica contínua. Esse banho é composto basicamente de criolita e fluoretos, onde estão mergulhados os anodos de carbono pré-cozidos (pólo positivo), que reagem com o oxigênio liberado pela dissociação da alumina. Os gases são coletados e tratados nos reatores antes de serem lançados na atmosfera. O pólo negativo também é constituído de matéria à base de carbono sobre o qual se deposita o alumínio líquido, resultante da eletrólise. Alumínio produzido é extraído, por sucção, através de cadinhos e transportado para o lingotamento.

Entre os principais resíduos produzidos na área da redução, destacam-se os fluoretos gerados, principalmente, nas cubas eletrolíticas, pó de coque e piche, tijolos refratários, anodos gastos, revestimento gasto de cubas, banho eletrolítico, sucata de fundo de cadinho, borra de alumínio e os gases de fornos de cozimento de anodos.



Figura 4.5 – Vista aérea da redução [20]

4.3. Plano de Monitoramento e Gestão Ambiental da Alumar

O Sistema de Gestão Ambiental da Alumar tem como um dos pilares a conscientização dos seus empregados. A concepção deste sistema ocorreu três anos antes do início das atividades operacionais da Alumar, quando já se realizava uma série de estudos e levantamentos sobre a região de implantação da fábrica. Aliados às modernas tecnologias de processo industrial, o diagnóstico possibilitou o desenvolvimento de um amplo programa de gerenciamento ambiental. Esse programa tem como suporte a qualificação de engenheiros e técnicos especializados, a conscientização e educação dos empregados para uma operação ambientalmente segura e a instalação de equipamentos e sistemas de controle ambiental de tecnologia avançada. Para isso foram aplicados cerca de 10% dos investimentos totais do projeto de implantação da fábrica.

O Sistema de Gestão Ambiental e todas as ações necessárias à sua implantação e consolidação foram reconhecidos em 2000 quando a Alumar foi certificada pela norma internacional ISO 14001. A implantação da ISO 14001 requer um intenso envolvimento e comprometimento por parte de todos os empregados na identificação dos aspectos ambientais das suas respectivas atividades e proposição de procedimentos operacionais que minimizam ou até eliminam o impacto ambiental associado. Esse é o diferencial do Sistema de Gestão Ambiental da ALUMAR: As Pessoas.

Para garantir a melhoria contínua do Sistema de Gestão Ambiental e conseqüente manutenção do certificado ISO 14001, a Alumar passa por auditorias periódicas realizadas por uma entidade certificadora. Além desse processo de auditoria externa, a Alumar possui um sistema de auditoria interno mantido por funcionários que passam por um treinamento para formação de auditores, com o foco em gestão ambiental, segurança e saúde ocupacional.

A Alumar possui uma Estratégia de Meio Ambiente para o futuro que estabelece metas ambientais audaciosas com o objetivo de promover um futuro totalmente sustentável para a produção da fábrica. Toda ela foi planejada para 20 anos (2000-2020), com foco no tripé: meio ambiente, rentabilidade e responsabilidade social (Fig. 4.6)

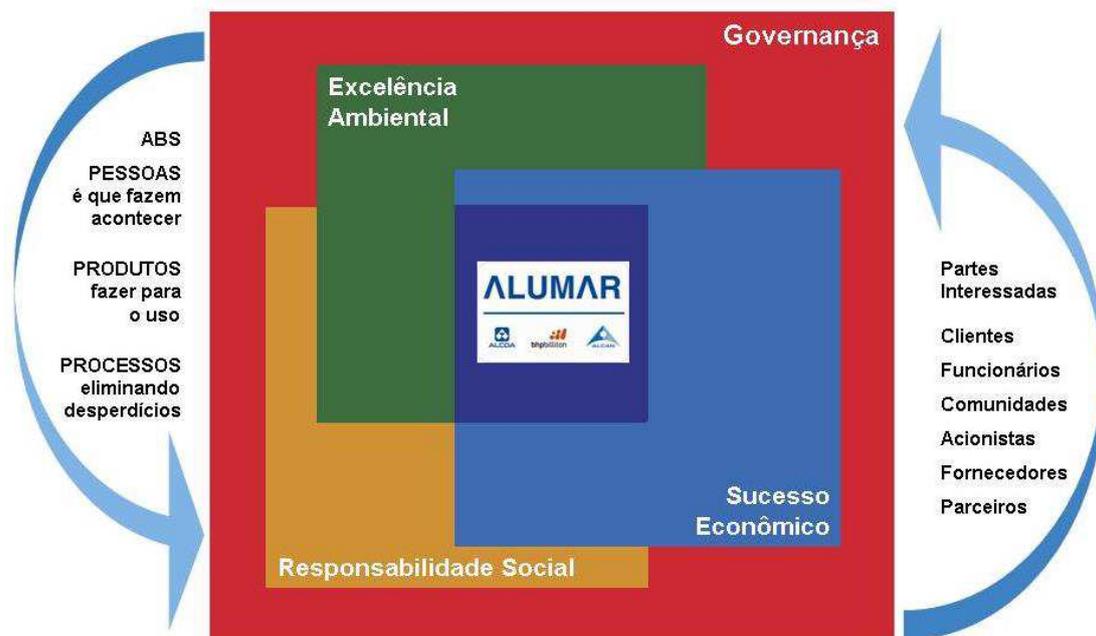


Figura 4.6 - Modelo de Sustentabilidade da Alumar [20]

Como parte integrante do sistema de gestão a Alumar desenvolveu o Plano de Monitoramento e Gerenciamento Ambiental, que tem como objetivo fundamental, atender às exigências estabelecidas pela Licença de Operação expedida pela Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Maranhão – SEMA, onde constam informações referentes ao monitoramento das emissões atmosféricas, limites de emissões (Tabelas 4.1 e 4.2) da qualidade do ar ambiente, das descargas líquidas, das águas superficiais e subterrâneas nas áreas de influência da fábrica e da vegetação no entorno do complexo industrial da Alumar; bem como métodos de análise e periodicidade das amostragens.

Tabela 4.1 – Padrões de qualidade do ar exigidos pela licença de operação da Alumar [19]

Poluente	Concentração ao Nível do Solo ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Período de Exposição
Partículas Totais em Suspensão	240	Média de 24 horas (*)
	80	Média Geométrica Anual
Dióxido de Enxofre	365	Média de 24 horas (*)
	80	Média Aritmética Anual
Fluoretos Gasosos	3,7	Média de 12 horas
	2,9	Média de 24 horas
	0,84	Média Aritmética Anual

(*) não deve ser excedido mais que uma vez por ano

Tabela 4.2 – Padrões internacionais de emissões de fluoreto gasoso [19]

Parâmetro ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Período
3,7	12 horas
2,9	24 horas
0,84	30 dias
0,5	90 dias

4.4. Gerenciamento das Emissões Atmosféricas e Qualidade do Ar da Alumar

A Alumar é reconhecida mundialmente pela sua excelente performance em relação aos níveis de emissões atmosféricas. Isso é o resultado do Sistema de Controle de Emissões concebido pela empresa, ainda na etapa de projeto de implantação da fábrica.

Os sistemas de controle de emissões são constituídos basicamente por sistemas de filtros de mangas, precipitadores eletrostáticos, reatores com leito de alumina fluidizado (Fig. 4.7) e sistemas avançados de controle de combustão. Além dos equipamentos de controle, a Alumar

tem instalado em diversos pontos estratégicos, equipamentos de monitoramento contínuo de emissões a fim de garantir o controle de processo.



Figura 4.7 - Reator A-398, equipamento de controle ambiental responsável pelo tratamento dos gases das salas de cubas.

As melhorias operacionais implantadas ao longo dos anos na redução da Alumar têm garantido redução de emissões de gases do efeito estufa (PFC – perfluorcarbonos, oriundos do processo de eletrólise), mas o desenvolvimento e a aplicação de novas tecnologias é que tem o maior potencial para ganhos mais significativos.

Como essas emissões estão diretamente associadas à estabilidade do processo, a Alumar atuou em três iniciativas que também permitem melhoria de produtividade: mudanças no desenho do anodo e sistema de alimentação, desenvolvimento de novas lógicas para o computador de controle das cubas e melhorias de processo integradas ao ABS (Alcoa Business System).

Para garantir baixas concentrações de particulados e dióxido de enxofre no ar ambiente, além de todos os controles descritos anteriormente, a Alumar utiliza combustíveis com baixos teores de enxofre e chaminés adequadamente projetadas para garantir a eficiente dispersão das emissões e tem investido na utilização de biocombustível nos fornos de cozimento de anodo.

4.5. Resultados das Simulações da Qualidade do Ar Utilizando o Algoritmo Proposto

4.5.1. Comparação com Resultados de Simuladores Comerciais

Em 2003, durante a elaboração do Estudo de Impacto Ambiental do projeto de expansão da linha #3 da sala de cubas, foi elaborado o estudo de dispersão considerando as emissões complementares do projeto para avaliação do atendimento aos padrões de qualidade do ar. Na ocasião foi contratada uma empresa de consultoria externa que utilizou o modelo comercial chamado “CALPUFF”, referendado pela EPA (*Environmental Protection Agency*), através do qual foram estimadas as concentrações ao nível do solo, em receptores pré- determinados pelo modelo, bem como em receptores discretos determinados de acordo com a abrangência do estudo.

O sistema de modelagem “CALPUFF” é baseado em fórmulas de “Puffs Gaussianos”, onde plumas são simuladas como “*puffs*” discretos que se movem no espaço e no tempo em condições variáveis. As fórmulas do CALPUFF permitem simulações com efeitos tridimensionais quando uma caracterização representativa de ventos pode ser construída. Outra vantagem atribuída a esse sistema de modelagem, é que possibilita a execução da modelagem, para diversos tipos de fontes, a saber: fontes pontuais, fontes áreas, fontes linhas e fontes volume [21].

Os resultados das simulações, tanto do CALPUFF como o modelo proposto, foram comparados posteriormente com os resultados da estação meteorológica de Coqueiro pelo fato de ser a única estação com resultados contínuos todos os meses do ano (nas outras é feito um revezamento mensal com a estação móvel) e pelo fato de que coqueiro está preferencialmente no sentido dos ventos da dispersão das emissões da Redução conforme Rosa dos Ventos típica da região (anexo 2).

Considerando os dados médios de emissões e parâmetros meteorológicos de 2002 e 2003 os resultados de fluoreto gasoso simulados, na estação meteorológica de Coqueiro, foram:

- 0,46 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ através do CALPUFF (Tabela 4.3) e 0,48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ através do modelo proposto (Tabela 4.4)

Tabela 4.3 – Resultados utilizando o modelo CALPUFF [20]

Estação	Período	Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Padrão de Qualidade do Ar ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
Coqueiro	24 horas	2,51	2,9
	Anual	0,46	0,84

Tabela 4.4 – Comparação de resultados CALPUFF x modelo proposto (utilizando as mesmas informações de entrada (anexo 2.0) do modelo CALPUFF no modelo proposto)

Estação	Período	Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) - CALPUFF	Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – Modelo Proposto	Erro (CALPUFF – Modelo Proposto) /CALPUFF
Coqueiro	Anual	0,46	0,48	4,35%

4.5.2. Correlação dos Resultados da Estação de Coqueiro com as Taxas de Emissões

Na tentativa de demonstrar alguma correlação direta da concentração de fluoreto com a taxa de emissões nas fontes, foi tomado como base o ano de 2004 (anexo 3), onde foram correlacionadas as taxas de emissões mensais (sala de cubas e fornos de cozimento) com os valores coletados na estação de coqueiro (concentração de fluoreto em $\mu\text{g}/\text{m}^3$). O gráfico 4.1 mostra a correlação dos números, com um R^2 de apenas 22%, confirmando que deve existir um mecanismo de dispersão entre a fonte emissora e o corpo receptor que considera outras variáveis além somente das taxas de emissões.

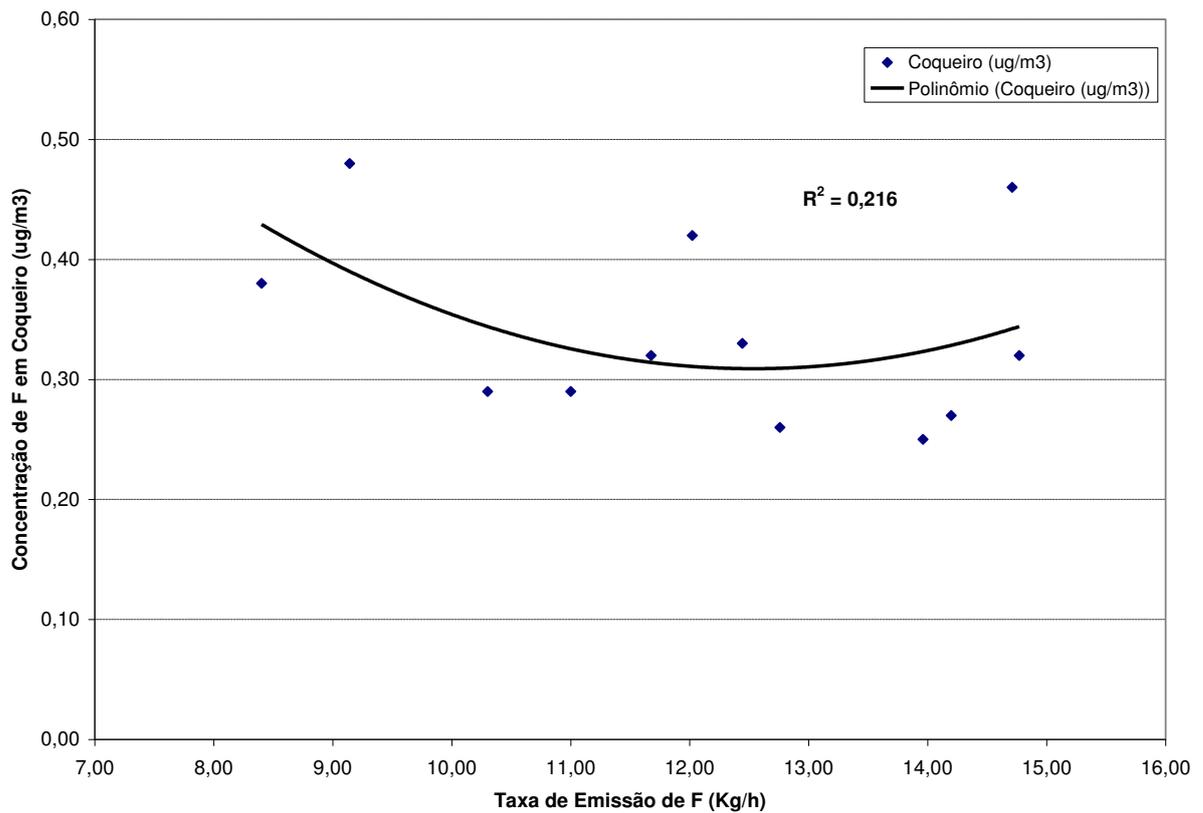


Gráfico 4.1 - Correlação dos resultados da estação de Coqueiro com as taxas de emissões (Kg/h)

4.5.3. Correlação dos Resultados da Estação de Coqueiro com os Resultados do Modelo Proposto

A comparação foi feita utilizando os valores médios de fluoreto, medidos na estação de monitoramento contínuo de Coqueiro, entre os anos de 1999 a 2006, submetidas à Secretaria de Meio Ambiente do Estado – SEMA [21] através dos relatórios de monitoramento ambiental. Os valores do modelo foram obtidos utilizando as taxas médias de emissões de fluoreto gasoso (Kg/h) dos fornos de cozimento de anodo e salas de cubas da Alumar (anexo 4). Tanto os valores médios anuais da estação de Coqueiro, bem como os resultados das simulações encontram-se na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Comparação de resultados da estação de Coqueiro com o modelo proposto

Estação	Período	Concentração Média Coqueiro ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Concentração ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) – Modelo Proposto	Erro (Coqueiro – Modelo Proposto) /Coqueiro
Coqueiro	1998	0,28	0,20	28%
	1999	0,23	0,24	4,3%
	2000	0,31	0,27	13,0%
	2001	45	36	20,0%
	2002 e 2003*	0,46	0,48	4,3%
	2004	0,34	0,35	2,9%
	2005	0,34	0,32	5,9%
	2006	0,46	0,48	4,3%

* valores médios utilizados no EIA/RIMA

A fim de aperfeiçoar a análise crítica da comparação entre os valores encontrados em Coqueiro e os valores simulados foi elaborado um gráfico de correlação entre os valores (Gráfico 4.2). Conforme observado no gráfico, pode-se identificar claramente uma correlação entre os valores medidos e os valores simulados.

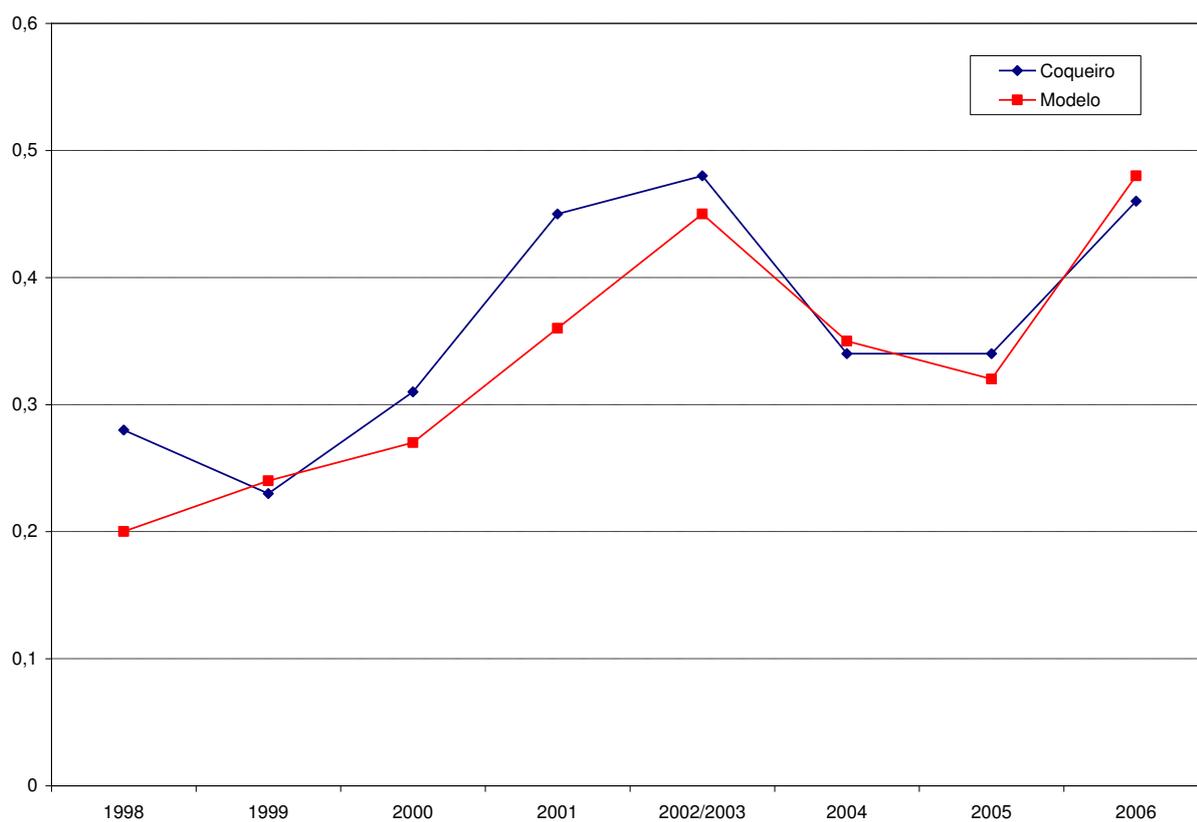


Gráfico 4.2 – Comparação de tendência dos resultados da estação de Coqueiro e do modelo proposto

Para apurar ainda mais a confiabilidade do modelo, foi elaborado um segundo gráfico (Gráfico 4.3), sendo este um gráfico de dispersão entre os valores medidos e simulados. Desta vez, considerando as variáveis descritas no modelo (influência dos ventos, cálculo da altura de pluma, distribuição de Gauss, etc.) a correlação foi de 82%.

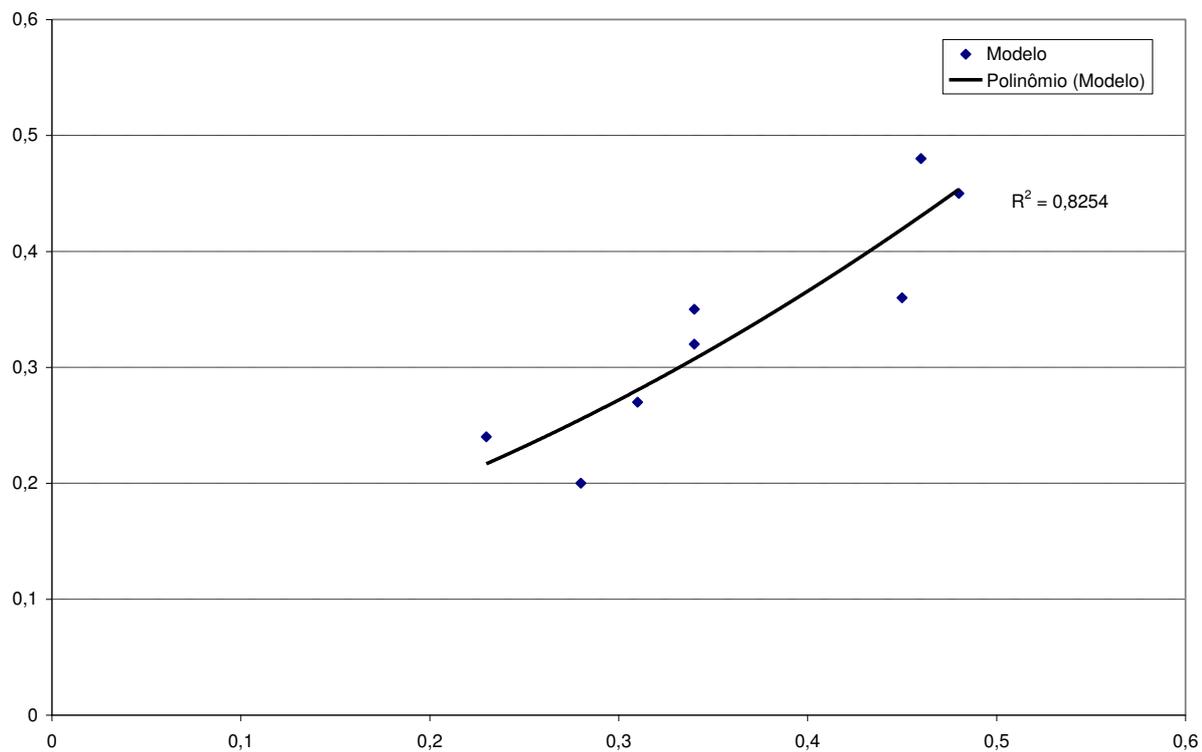


Gráfico 4.3 - Correlação dos resultados da estação de Coqueiro com os valores do modelo proposto

5. Resultados e Discussões

As simulações apresentadas no capítulo 4 são importantes para demonstrar o alinhamento dos conceitos, com base nos mecanismos e fenômenos de transportes, que caracterizam a dispersão atmosférica. Tomando apenas como base uma correlação direta entre a taxa de emissões de fluoreto e o resultado da qualidade do ar, a correlação foi de aproximadamente de 22%. É lógico que era esperado uma baixa correlação. Essa correlação foi feita propositalmente para demonstrar que o entendimento dos fenômenos de dispersão dos poluentes é preponderante, e determinante, para uma análise crítica mais efetiva dos reais impactos das emissões lançadas por uma fonte na qualidade do ar.

O modelo proposto atendeu a expectativa uma vez que, apesar das suas considerações, obteve uma boa correlação com os resultados medidos na estação de Coqueiro, que foi tomada como referência para este estudo. Mesmo nos anos em que a Alumar experimentou um acréscimo nos resultados de qualidade do ar de Coqueiro, o modelo também seguiu tal tendência. Os picos de qualidade do ar, do período avaliado, foram caracterizados basicamente por períodos em que a Alumar passou por processo de desligamento de cubas, por motivos de racionamento (2001) ou por desligamento de retificador (2002/2002) e por processos posteriores de re-ligamento e expansão como foi em 2006 com a partida de mais 100 cubas eletrolíticas. Os processos de desligamento e posterior re-ligamento são períodos mais intensos de emissões de fluoreto, devido a necessidade de adicionar banho eletrolítico com as cubas abertas, e por instabilidade de processo que podem perdurar alguns meses. Motivos esses que podem caracterizar os períodos de 2001, 2002, 2003 e 2006. Mas mesmo assim, os valores ainda continuam bem abaixo dos valores padrões de referência ($0,84 \mu\text{g}/\text{m}^3$). A correlação entre os valores do modelo e os valores registrados na estação de Coqueiro foi de 82%, utilizando como base as médias anuais dos parâmetros para entrada no modelo e as médias das concentrações registradas em campo. Por fim, o modelo simulou tanto o comportamento de tendência, quanto o resultado quantitativo.

Analisando os resultados, também é possível perceber a correlação dos resultados com a velocidade do vento. Nos períodos de picos de fluoreto na estação de qualidade do ar em coqueiro, foram os anos em que as médias da velocidade do vento foram as mais baixas do período avaliado. Como menor valor observou-se os anos de 2002/2003 com uma média de 1,51 m/s de velocidade do vento e o maior valor foi em 1999 com 1,95 m/s. Simulando com valores

típicos de taxa de emissão, o valor crítico para velocidade do vento são valores abaixo de 1,60 m/s que apontam para valores próximos de 0,40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Isso é possível considerando o fator de mistura, ou o grau de turbulência causado pelo aumento do vento. Para velocidades menores, a pluma se comportará com uma dispersão em regime laminar promovendo altas concentração mesmo considerando uma distância considerável da fonte de lançamento. Já com altas velocidades de vento, o grau de mistura é maior. Essa análise pode ser feita avaliando as equações dos coeficientes de dispersão vertical e horizontal (σ_y e σ_x) que aumentam em função da estabilidade atmosférica. Ou seja, para atmosfera instáveis (maior velocidade do vento) os coeficientes são maiores, causando uma dispersão maior da pluma no sentido vertical e horizontal, conforme equações de Turner.

Comparado com as simulações realizadas utilizando o CALPUFF, o modelo proposto apresentou uma diferença de 4,3%. Neste caso também foram utilizadas médias anuais como parâmetros e entradas.

Com estes resultados fica evidente que o modelo proposto, baseado na distribuição de Gauss (modelos gaussianos), apresentam uma boa aderência aos resultados de campo considerando uma microescala de distância das fontes.

6. Conclusões e Recomendações

O entendimento das variáveis que impactam significativamente as dispersões atmosféricas é de extrema importância para saber onde atuar para reduzir os impactos ambientais causados pelas emissões industriais, tendo em vista que algumas variáveis são “manipuláveis” (por exemplo: taxa de emissão e temperatura dos efluentes) e outras são naturais, sem interferência antropogênica, por exemplo: velocidade e direção do vento.

O modelo demonstrou exatamente isso quando apontou aumento na qualidade do ar quando as taxas foram maiores, correlacionadas com os menores valores de velocidade do vento no período.

O modelo proposto apresentou correlação de 82% com os resultados coletados na estação de monitoramento contínuo de Coqueiro e 4,3% quando comparado com outro modelo teórico (CALPUFF). Pode-se considerar uma boa correlação em função das limitações impostas ao modelo, principalmente o fato de não incluir as taxas de emissões dos reatores (que no caso da Alumar, é uma outra fonte de emissão de fluoreto).

O uso rotineiro do modelo proposto será de grande valia para os engenheiros de meio ambiente da Alumar, no tocante as avaliações de novos projetos e mudanças de processo. Para melhor otimização da ferramenta algumas recomendações são sugeridas:

- Otimizar o modelo incluindo as emissões dos reatores
- Incluir rotinas transientes no modelo
- Incluir todas as 6 classes de estabilidade previstas por Pasquill
- Considerar o modelo como uma ferramenta disponível para avaliação de projetos e mudanças de processo.

**ANEXO 1 – Modelo Matemático Proposto das Emissões de
Fluoreto Gasoso de uma Redução Eletrolítica de Alumínio
Utilizando o Software *Mathcad 11 Enterprise Edition***

Modelo Matemático Proposto das Emissões de Fluoreto Gasoso de uma Redução Eletrolítica de Alumínio Utilizando o Software *Mathcad 11 Enterprise Edition*
(Impacto dos Fornos de Cozimento de Anodo + Salas de Cubas)

Universidade Federal de Campina Grande - UFCG
Centro de Ciências e Tecnologia - CCT
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química
Mestrando: Valério de Araújo Gomes
Orientadores: Prof^o.Dr. José Jailson Nicácio Alves
Prof^o PhD Michel François Fossy

1. Entrada de Dados dos Fornos de Cozimento de Anodos

Dados da Chaminé

Velocidade de saída dos gases na chaminé (Considerar taxa média de um período)

U1 := 4.7 (Considerar taxa média dos Fornos 1 e 2)

U3 := 9.3 (Considerar taxa média do Forno 3)

Temperatura de saída dos gases (K) (Considerar a média das três chaminés)

Ts := 39

Diâmetro da chaminé (m) (Todas as chaminés têm o mesmo diâmetro)

d := 4

Altura da chaminé (m) (Todas as chaminés têm a mesma altura)

H := 6

Taxa de emissão (g/s) (Considerar a taxa média de um período)

Q := 1.2 (Considerar a soma das médias dos Fornos 1 e 2)

Q3 := 0.0 (Considerar taxa média do Forno 3)

2. Entrada de Dados das Salas de Cubas

Dados Comuns as 3 Linhas

Altura da sala (m) (Todas as linhas têm a mesma altura)

Hsc := 2

Dados Específicos da Linha 1

Temperatura de saída dos gases (K) (Considerar a média de um período)

TsL1:= 313

Taxa de emissão (g/m/s) (Considerar a média de um período)

QL1:= 0.001

Velocidade de saída (m/s) (Considerar a média de um período)

UL1:= 1.48

Comprimento da Linha 1 (m)

LL1:= 750

Dados Específicos da Linha 2

Temperatura de saída dos gases (K) (Considerar a média de um período)

TsL2:= 315

Taxa de emissão (g/m/s) (Considerar a média de um período)

QL2:= 0.001

Velocidade de saída (m/s) (Considerar a média de um período)

UL2:= 1.17

Comprimento da Linha 1 (m)

LL2:= 950

Dados Específicos da Linha 3

Temperatura de saída dos gases (K) (Considerar a média de um período)

TsL3:= 315

Taxa de emissão (g/m/s) (Considerar a média de um período)

QL3:= 0.000

Velocidade de saída (m/s) (Considerar a média de um período)

UL3:= 1.14

Comprimento da Linha 1 (m) (Considerar a média de um período)

LL3:= 950

Largura das salas (m) (Todas as linhas têm a mesma largura)

Wsc := 42

3. Entrada de Dados Meteorológicos e Constantes

Dados Meteorológicos

Temperatura ambiente (K) (Considerar a média de um período)

$$T_a := 300.15$$

Classe de Estabilidade

(P = 0.20 - Atmosfera Instável)

(P = 0.25 - Atmosfera Neutra)

(P = 0.30 - Atmosfera Estável)

$$P := 0.30$$

Altura de medição do vento (estação meteorológica) (m)

$$Z_1 := 10$$

Velocidade do vento (m/s) (Considerar a média de um período)

$$w_s := 1.30$$

Constantes

$g_1 := 9.8$ (aceleração da gravidade - m/s^2)

$\beta := 0.6$ (parâmetro empírico do modelo - BLP Guidelines - 1980)

$d\theta/dz := \begin{cases} 0.005 & \text{if } P = 0.20 \\ 0.010 & \text{if } P = 0.25 \\ 0.02 & \text{if } P = 0.30 \end{cases}$ (gradiente de temperatura potencial - K/m
BLP Guidelines - 1980)

$ss := \frac{g_1}{T_a} \cdot d\theta/dz$ (Parâmetro de estabilidade - BLP Guidelines - 1980)

$D := 200$ (Altura Estimada da Inversão Térmica)

Coordenadas do Receptor em Relação ao Centro da Pluma

$x := 1..300$ (distância na coordenada x entre a fonte e o receptor)

$y := 0$ (distância na coordenada y entre a fonte e o receptor.
quando $y=0$ o receptor está no centro da pluma)

4. Cálculo dos Coeficientes de Dispersão (σ_y e σ_x)

Parâmetros para os Coeficientes de dispersão (σ_y e σ_x)

(Coeficientes de TURNER - Lora, Elector - 2002)

$$I_y := \begin{cases} -2.054 & \text{if } P = 0.20 \\ -2.555 & \text{if } P = 0.25 \\ -2.754 & \text{if } P = 0.30 \end{cases} \quad K_y := \begin{cases} -0.0076 & \text{if } P = 0.20 \\ -0.0087 & \text{if } P = 0.25 \\ -0.0064 & \text{if } P = 0.30 \end{cases}$$

$$J_y := \begin{cases} 1.0231 & \text{if } P = 0.20 \\ 1.0423 & \text{if } P = 0.25 \\ 1.0106 & \text{if } P = 0.30 \end{cases} \quad I_z := \begin{cases} -2.341 & \text{if } P = 0.20 \\ -3.186 & \text{if } P = 0.25 \\ -3.783 & \text{if } P = 0.30 \end{cases}$$

$$J_z := \begin{cases} 0.9477 & \text{if } P = 0.20 \\ 1.1737 & \text{if } P = 0.25 \\ 1.3010 & \text{if } P = 0.30 \end{cases} \quad K_z := \begin{cases} -0.0020 & \text{if } P = 0.20 \\ -0.0316 & \text{if } P = 0.25 \\ 0.045 & \text{if } P = 0.30 \end{cases}$$

4.1 Cálculo dos coeficientes de dispersão vertical e horizontal

$$\sigma_y(x) := e^{\left[I_y + J_y \cdot \ln(x) + K_y \cdot (\ln(x))^2 \right]} \quad (\text{Cálculo do coeficiente de dispersão vertical})$$

$$\sigma_z(x) := e^{\left[I_z + J_z \cdot \ln(x) + K_z \cdot (\ln(x))^2 \right]} \quad (\text{Cálculo do coeficiente de dispersão horizontal})$$

5. Modelagem das Dispersões Atmosféricas Provenientes dos Fornos de Cozimento de Anodo

5.1 Correção da velocidade do vento na altura da chaminé (m/s)

$$w_z := w_s \cdot \left(\frac{H}{Z_1} \right)^P \quad (\text{Correção da velocidade do vento - BLP Guidelines - 1980})$$

$$w_z = 2.225$$

5.2 Cálculo da Altura da Pluma (HP) e Altura Efetiva para os Fornos 1 e 2

$$F_b := U_1 \cdot g_1 \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \quad \text{(Fluxo de Flotação - m}^4\text{/s}^3\text{)} \\ \text{BLP Guidelines - 1980)}$$

$$F_b = 42.427$$

$$x_a := \begin{cases} \left(\left(\frac{5}{14 F_b} \right) \right) & \text{if } F_b \leq 55 \\ \left(\left(\frac{2}{34 F_b} \right) \right) & \text{if } F_b > 55 \end{cases}$$

$$x_b(x) := \begin{cases} x & \text{if } x \leq 3.5 x_a \\ (3.5 x_a) & \text{if } x > 3.5 x_a \end{cases}$$

$$E := 3 + 3 \cdot P$$

$$HP(x) := \begin{cases} \left[\left[\frac{E^2}{2 \cdot (3 + P)} \cdot \left(\frac{F_b \cdot H^{3 \cdot P}}{\beta^2 \cdot U_1^3} \right) \right]^{\frac{1}{E}} \cdot x_b(x)^{\frac{2}{E}} \right] & \text{if } P = 0.25 \vee P = 0.20 \\ \left[2.6 \left(\frac{F_b \cdot T_a}{wz \cdot d \theta dz \cdot g_1} \right)^{\frac{1}{3}} \right] & \text{if } P = 0.30 \end{cases}$$

$$HE(x) := HP(x) + H \quad \text{(Altura Efetiva da Chaminé - m)}$$

5.3 Cálculo da Concentração ao Nível do Solo para os Fornos 1 e 2

(Equação da Pluma Gaussiana para Fontes Pontuais - BLP Guideline 1980)

$$C_f(x, y) := \begin{cases} \frac{Q}{3.1415 \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot ws} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y(x)} \right)^2} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{HE(x)}{\sigma_z(x)} \right)^2} \cdot 1000000 & \text{if } P = 0.30 \\ \frac{Q}{3.1415 \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x) \cdot ws} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y(x)} \right)^2} \cdot \left[\sum_{n=-1000}^{1000} e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{HE(x) + 2 \cdot n \cdot D}{\sigma_z(x)} \right)^2} \right] \cdot 1000000 & \text{if } P = 0.20 \vee P = 0.25 \end{cases}$$

GRÁFICO - Variação da Concentração em função da distância em x da fonte

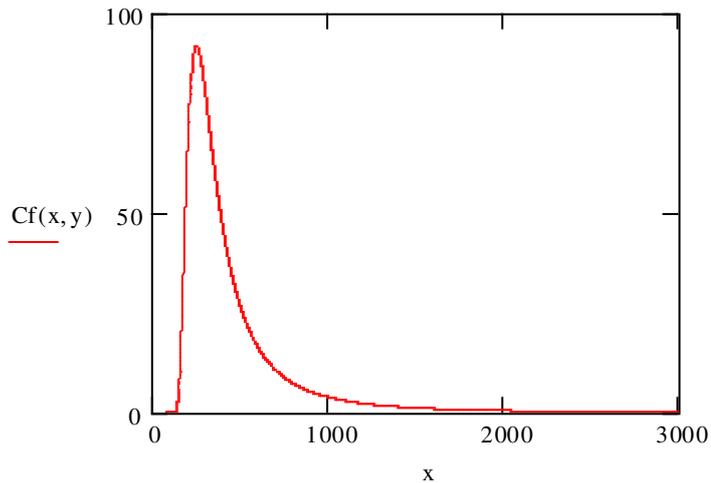
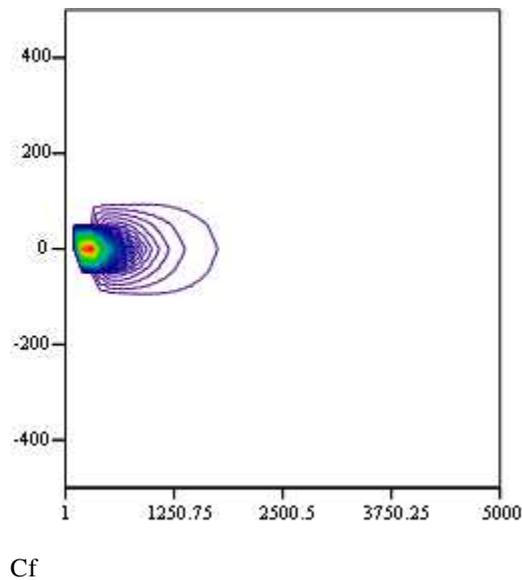


GRÁFICO - Pluma de dispersão nas coordenadas x,y dos fornos de cozimento 1 e 2



5.4 Cálculo da Altura da Pluma (HP) e Altura Efetiva para o Forno 3

$$F_b := U^3 \cdot g \cdot \frac{d^2}{4} \cdot \left(\frac{T_s - T_a}{T_s} \right) \quad \text{(Fluxo de Flotação - m}^4\text{/s}^3 \text{ BLP Guidelines - 1980)}$$

$$F_b = 84.493$$

$$x_a := \begin{cases} \left(\left(\frac{5}{14 F_b} \right)^{\frac{8}{5}} \right) & \text{if } F_b \leq 55 \\ \left(\left(\frac{2}{34 F_b} \right)^{\frac{5}{5}} \right) & \text{if } F_b > 55 \end{cases}$$

$$x_b(x) := \begin{cases} x & \text{if } x \leq 3.5 x_a \\ (3.5 x_a) & \text{if } x > 3.5 x_a \end{cases}$$

$$E := 3 + 3 \cdot P$$

(Cálculo da altura efetiva considerano o tipo de classe atmosférica - BLP Guidelines - 1980)

$$HP(x) := \begin{cases} \left[\left[\frac{E^2}{2 \cdot (3 + P)} \cdot \left(\frac{F_b \cdot H^{3 \cdot P}}{\beta^2 \cdot U^3} \right)^{\frac{1}{E}} \right] \cdot x_b(x)^{\frac{2}{E}} \right] & \text{if } P = 0.25 \vee P = 0.20 \\ \left[2.6 \left(\frac{F_b \cdot T_a}{wz \cdot d \theta dz \cdot g1} \right)^{\frac{1}{3}} \right] & \text{if } P = 0.30 \end{cases}$$

$$HE(x) := HP(x) + H \quad (\text{Altura Efetiva da Chaminé - m})$$

5.5 Cálculo da Concentração Ao Nível do Solo para o Forno 3

(Equação da Pluma Gaussiana para Fontes Pontuais - BLP Guideline 1980)

$$\text{CB}(x,y) := \begin{cases} \frac{Q3}{3.1415\sigma_y(x)\cdot\sigma_z(x)\cdot ws} \cdot e^{-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{y}{\sigma_y(x)}\right)^2} \cdot e^{-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{HE(x)}{\sigma_z(x)}\right)^2} \cdot 1000000 & \text{if } P = 0.30 \\ \frac{Q3}{3.1415\sigma_y(x)\cdot\sigma_z(x)\cdot ws} \cdot e^{-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{y}{\sigma_y(x)}\right)^2} \cdot \left[\sum_{n=-1000}^{1000} e^{-\frac{1}{2}\cdot\left(\frac{HE(x)+2\cdot n\cdot D}{\sigma_z(x)}\right)^2} \right] \cdot 1000000 & \text{if } P = 0.20 \vee P = 0.25 \end{cases}$$

GRÁFICO - Variação da Concentração em função da distância em x da fonte

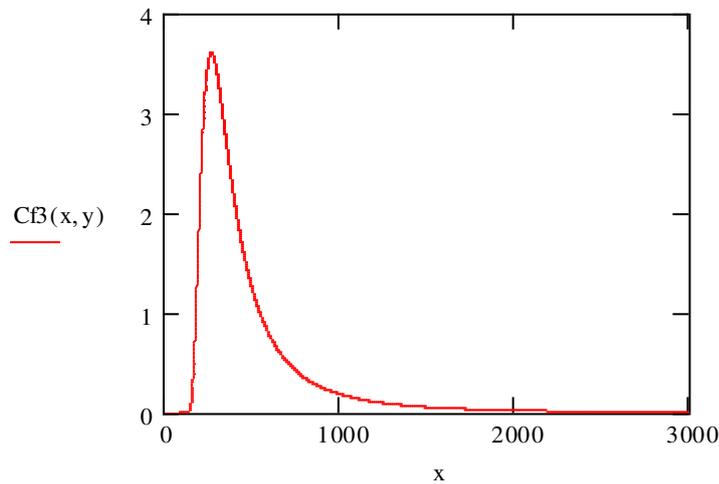
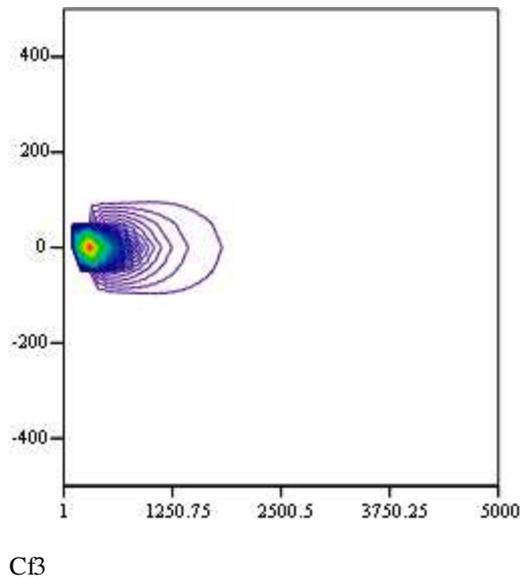


GRÁFICO - Pluma de dispersão nas coordenadas x,y do forno 3



6. Modelagem das Dispersões Atmosféricas Provenientes das Salas de Cubas

6.1 Correção da velocidade do vento na altura da linha (m/s)

$$U_z := ws \cdot \left(\frac{H_{sc}}{Z_1} \right)^P \quad \text{(Correção da velocidade do vento - BLP Guidelines - 1980)}$$

$$U_z = 1.6$$

6.1 Cálculo da Altura da Pluma (HP) e Altura Efetiva - Linha 1

$$F_b := UL_1 \cdot g_1 \cdot LL_1 \cdot W_{sc} \cdot \frac{T_s L_1 - T_a}{T_s L_1} \quad \text{(Fluxo de Flotação - m}^4\text{/s}^3\text{ BLP Guidelines - 1980)}$$

$$F_b = 1.87 \times 10^4$$

$$x_a := \begin{cases} \left(\left(\frac{5}{14 F_b} \right)^{\frac{1}{8}} \right) & \text{if } F_b \leq 55 \\ \left(\left(\frac{2}{34 F_b} \right)^{\frac{1}{5}} \right) & \text{if } F_b > 55 \end{cases}$$

$$x_b(x) := \begin{cases} x & \text{if } x \leq 3.5 x_a \\ (3.5 x_a) & \text{if } x > 3.5 x_a \end{cases}$$

(Cálculo da altura efetiva considerando o tipo de classe atmosférica - BLP Guidelines - 1980)

$$HPL_1(x) := \begin{cases} \left[\left(\frac{F_b}{2 \cdot \beta \cdot LL_1 \cdot U_z^3} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot x_b(x) \right] & \text{if } P = 0.25 \vee P = 0.20 \\ \left[\left(\frac{2 \cdot F_b}{\beta \cdot LL_1 \cdot U_z} \right)^{\frac{1}{2}} \right] & \text{if } P = 0.30 \end{cases}$$

$$HEL1(x) := Hsc + HPL1(x) \quad (\text{Altura Efetiva da Linha 1 - m})$$

6.2 Cálculo da Concentração Ao Nível do Solo (x,y) - Linha 1

(Equação da Pluma Gaussiana para Fonte Linear - BLP Guideline 1980)

$$g(x,y) := \begin{cases} \frac{1}{3.1415\sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y(x)}\right)^2} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{HEL1(x)}{\sigma_z(x)}\right)^2} \cdot 1000000 & \text{if } P = 0.30 \\ \frac{1}{3.1415\sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y(x)}\right)^2} \cdot \left[\sum_{n=-100}^{100} e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{HEL1(x)+2 \cdot n \cdot D}{\sigma_z(x)}\right)^2} \right] \cdot 1000000 & \text{if } P = 0.20 \vee P = 0.25 \end{cases}$$

$$CL1(x,y) := \left(\int_0^{LL1} g(x,y) dLL1 \right) \cdot \frac{QL1}{Uz}$$

GRÁFICO - Variação da concentração em função da distância em x da fonte

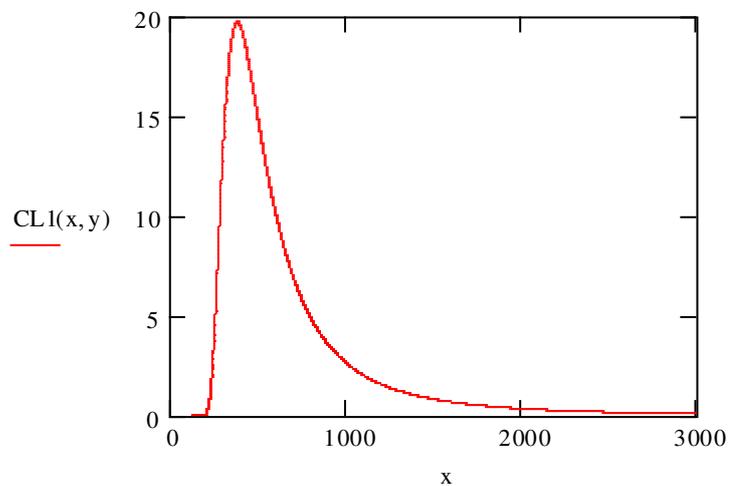
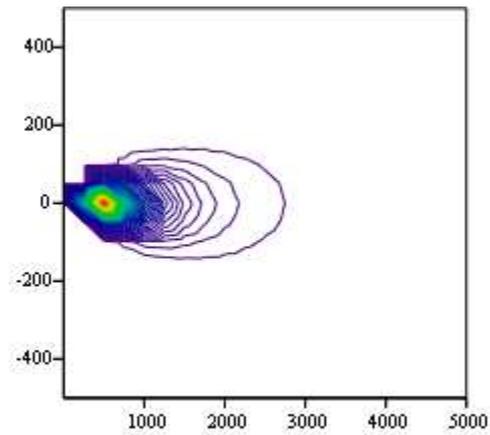


GRÁFICO - Pluma de dispersão das emissões da linha 1 nas coordenadas x,y



CL1

6.3 Cálculo da Altura da Pluma (HP) e Altura Efetiva - Linha 2

$$F_b := UL_2 \cdot g_1 \cdot LL_2 \cdot W_{sc} \cdot \frac{T_{sL2} - T_a}{T_{sL2}} \quad \text{(Fluxo de Flotação - m}^4/\text{s}^3 \text{ BLP Guidelines - 1980)}$$

$$F_b = 2.151 \times 10^4$$

$$x_a := \begin{cases} \left(\left(\frac{5}{14 F_b} \right)^{\frac{1}{8}} \right) & \text{if } F_b \leq 55 \\ \left(\left(\frac{2}{34 F_b} \right)^{\frac{1}{5}} \right) & \text{if } F_b > 55 \end{cases}$$

$$x_b(x) := \begin{cases} x & \text{if } x \leq 3.5 x_a \\ (3.5 x_a) & \text{if } x > 3.5 x_a \end{cases}$$

$$\text{HPL}\mathcal{L}(x) := \begin{cases} \left[\left(\frac{\text{Fb}}{2 \cdot \beta \cdot \text{LL2} \cdot \text{Uz}^3} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \text{xb}(x) \right] & \text{if } P = 0.25 \vee P = 0.20 \\ \left[\left(\frac{2 \cdot \text{Fb}}{\beta \cdot \text{LL2} \cdot \text{Uz} \cdot \text{ss}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] & \text{if } P = 0.30 \end{cases}$$

$$\text{HEL}\mathcal{L}(x) := \text{Hsc} + \text{HPL}\mathcal{L}(x) \quad (\text{Altura Efetiva da Linha 2 - m})$$

6.2 Cálculo da Concentração Ao Nível do Solo (x,y) - Linha 2

(Equação da Pluma Gaussiana para Fonte Linear - BLP Guideline 1980)

$$g(x,y) := \begin{cases} \frac{1}{3.1415\sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot e^{\left[\frac{-1}{2} \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y(x)} \right)^2 \right]} \cdot e^{\left[\frac{-1}{2} \cdot \left(\frac{\text{HEL}\mathcal{L}(x)}{\sigma_z(x)} \right)^2 \right]} \cdot 1000000 & \text{if } P = 0.30 \\ \frac{1}{3.1415\sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot e^{\frac{-1}{2} \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y(x)} \right)^2} \cdot \left[\sum_{n=-100}^{100} e^{\left[\frac{-1}{2} \cdot \left(\frac{\text{HEL}\mathcal{L}(x) + 2 \cdot n \cdot D}{\sigma_z(x)} \right)^2 \right]} \right] \cdot 1000000 & \text{if } P = 0.20 \vee P = 0.25 \end{cases}$$

$$\text{CL}\mathcal{L}(x,y) := \left(\int_0^{\text{LL2}} g(x,y) d\text{LL2} \right) \cdot \frac{\text{QL2}}{\text{Uz}}$$

GRÁFICO - Variação da concentração em função da distância em x da fonte

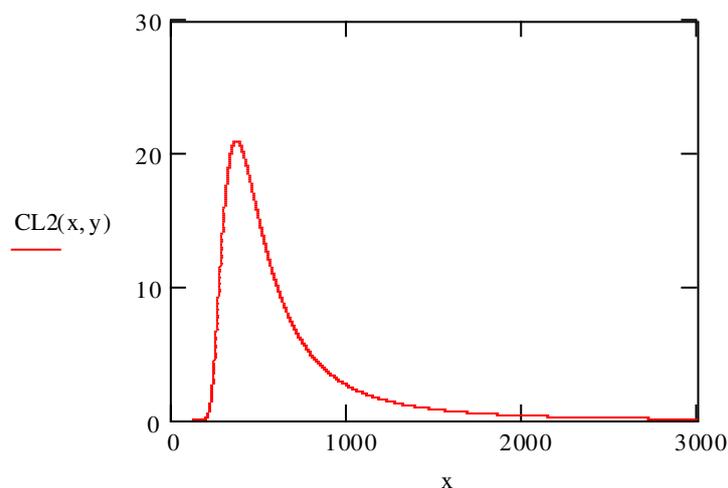
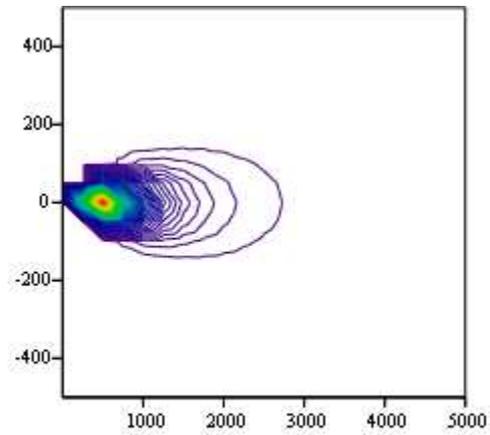


GRÁFICO - Pluma de dispersão das emissões da linha 2 nas coordenadas x,y



CL2

6.4 Cálculo da Altura da Pluma (HP) e Altura Efetiva - Linha 3

$$F_b := UL3 \cdot g1 \cdot LL3 W_{sc} \cdot \frac{T_s L3 - T_a}{T_s L3} \quad \text{(Fluxo de Flotação - m}^4\text{/s}^3 \text{ BLP Guidelines - 1980)}$$

$$F_b = 2.114 \times 10^4$$

$$x_a := \begin{cases} \left(\left(\left(\frac{5}{14 F_b} \right)^8 \right) \right) & \text{if } F_b \leq 55 \\ \left(\left(\left(\frac{2}{34 F_b} \right)^5 \right) \right) & \text{if } F_b > 55 \end{cases}$$

$$x_b(x) := \begin{cases} x & \text{if } x \leq 3.5 x_a \\ (3.5 x_a) & \text{if } x > 3.5 x_a \end{cases}$$

$$\text{HPL}\mathfrak{z}(x) := \begin{cases} \left[\left(\frac{\text{Fb}}{2 \cdot \beta \cdot \text{LL3} \cdot \text{Uz}^3} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \text{xb}(x) \right] & \text{if } P = 0.25 \vee P = 0.20 \\ \left[\left(\frac{2 \cdot \text{Fb}}{\beta \cdot \text{LL3} \cdot \text{Uz} \cdot \text{ss}} \right)^{\frac{1}{2}} \right] & \text{if } P = 0.30 \end{cases}$$

$$\text{HEL}\mathfrak{z}(x) := \text{Hsc} + \text{HPL}\mathfrak{z}(x) \quad (\text{Altura Efetiva da Linha 2 - m})$$

6.5 Cálculo da Concentração Ao Nível do Solo (x,y) - Linha 3

(Equação da Pluma Gaussiana para Fonte Linear - BLP Guideline 1980)

$$g(x,y) := \begin{cases} \frac{1}{3.1415 \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y(x)} \right)^2} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\text{HEL}\mathfrak{z}(x)}{\sigma_z(x)} \right)^2} \cdot 1000000 & \text{if } P = 0.30 \\ \frac{1}{3.1415 \sigma_y(x) \cdot \sigma_z(x)} \cdot e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{y}{\sigma_y(x)} \right)^2} \cdot \left[\sum_{n=-100}^{100} e^{-\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{\text{HEL}\mathfrak{z}(x) + 2 \cdot n \cdot D}{\sigma_z(x)} \right)^2} \right] \cdot 1000000 & \text{if } P = 0.20 \vee P = 0.25 \end{cases}$$

$$\text{CL}\mathfrak{z}(x,y) := \left(\int_0^{\text{LL3}} g(x,y) \, d\text{LL3} \right) \cdot \frac{\text{QL3}}{\text{Uz}}$$

GRÁFICO - Variação da concentração em função da distância em x da fonte

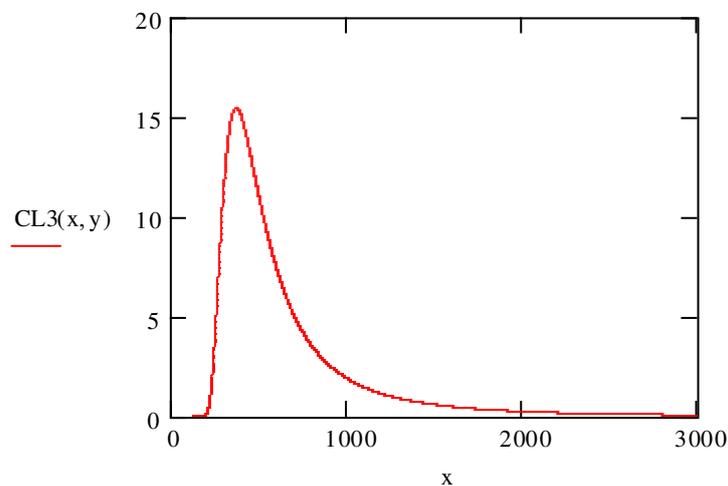
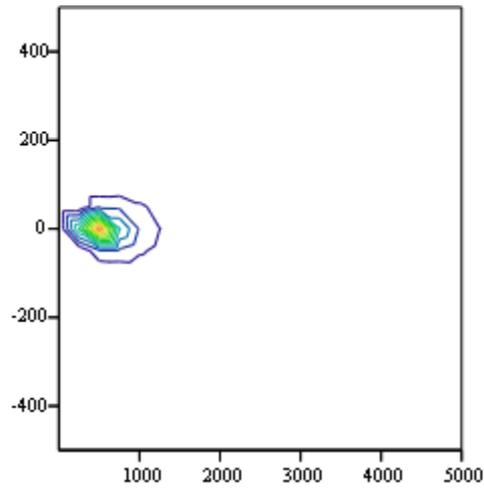


GRÁFICO - Pluma de dispersão das emissões da linha 3 nas coordenadas x,y

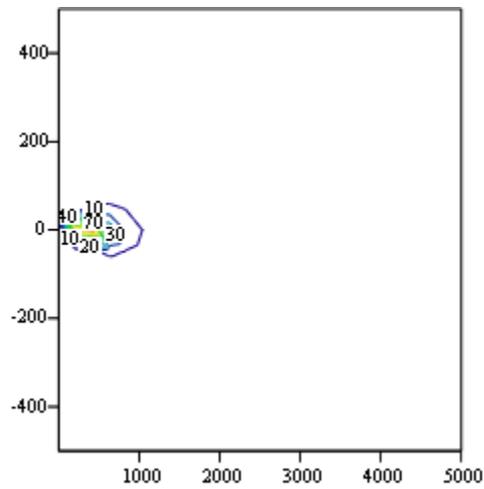


CL3

7 Cálculo da Concentração Ao Nível do Solo (x,y) - Soma das Parcelas

$$C_{total}(x,y) := (C_f(x,y) + CL1(x,y) + CL2(x,y) + CL3(x,y) + CB(x,y))$$

GRÁFICO - Pluma de dispersão das emissões, de todas as fontes consideradas no modelo, nas coordenadas x,y

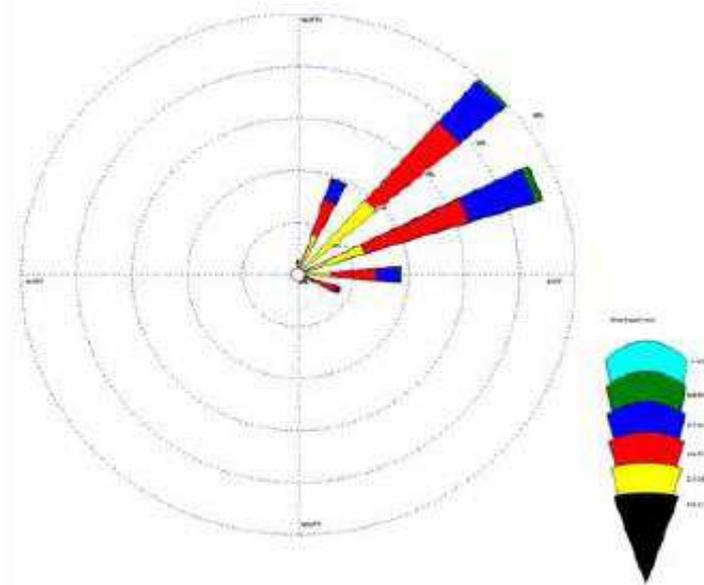


Ctotal

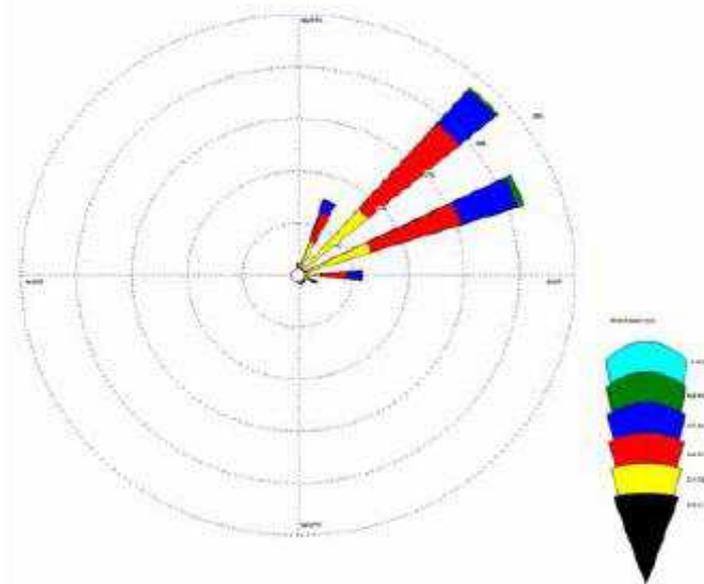
8 Concentração em Uma Coordenada Sob Influência de Todas as Fontes

$$C_{total}(3000,0) = 0.472$$

**ANEXO 2 – Rosa dos Ventos Típica da Região (Rosa de vento -
2002 – 2003, Aeroporto Internacional de São Luís)**



Rosa de Ventos - Ano 2001



Rosa de Ventos - Ano 2001

Rosa de vento - 2002 – 2003, Aeroporto Internacional de São Luís

ANEXO 3 – Tabela de Valores de Entrada de Simulação - 2004

Taxas de Emissões de Fluoreto (Kg/h) dos Fornos de Cozimento de Anodo e Salas de Cubas da Alumar - 2004

	jan/04	fev/04	mar/04	abr/04	mai/04	jun/04
Forno Cozimento 1	1,39	0,45	0,42	1,54	1,39	1,77
Forno Cozimento 2	0,52	1,06	0,32	1,66	1,31	1,05
Sala de Cubas 1	4,18	3,11	1,81	7,02	4,59	2,76
Sala de Cubas 2N	2,42	3,39	2,14	2,88	5,53	6,76
Sala de Cubas 2S	5,12	3,83	5,18	2,12	3,51	5,56
Sala de Cubas 2 (Méida 2N e 2S)	3,77	3,61	3,66	2,50	4,52	6,16
Sala de Cubas 3	2,58	3,79	2,19	1,99	2,39	3,03
Taxa Emissão de F (Soma Kg/h)	12,44	12,02	8,40	14,71	14,20	14,77
Coqueiro (ug/m3)	0,33	0,42	0,38	0,46	0,27	0,32

	jul/04	ago/04	set/04	out/04	nov/04	dez/04
Forno Cozimento 1	1,14	0,57	1,43	1,17	1,39	0,47
Forno Cozimento 2	0,41	0,33	1,39	0,49	0,96	0,74
Sala de Cubas 1	1,82	3,08	3,13	4,07	1,92	2,69
Sala de Cubas 2N	3,11	5,46	5,26	1,40	2,81	2,61
Sala de Cubas 2S	5,90	5,25	5,43	6,04	4,86	3,19
Sala de Cubas 2 (Méida 2N e 2S)	4,50	5,36	5,35	3,72	3,83	2,90
Sala de Cubas 3	2,43	2,33	2,66	3,30	2,89	2,33
Taxa Emissão de F (Soma Kg/h)	10,30	11,68	13,96	12,76	11,00	9,14
Coqueiro (ug/m3)	0,29	0,32	0,25	0,26	0,29	0,48

**ANEXO 4 – Tabela de Valores de Entrada – Médias Anuais
1999/2006 – E Constantes Utilizadas nas Simulações**

Tabelas de Valores Simulados – Taxas de Emissões Médias

Simulação 2 - 1999	
Velocidade Vento	1,95
Taxa de Emissão (g/s)	
Forno 1	0,172
Forno2	0,224
S. Cubas Linha 1	0,0009
S. Cubas Linha 2N	0,0009
S. Cubas Linha 2S	0,00103
S. Cubas 2	0,0010
S. Cubas 3	0,0008
Resultado (ug/m3)	0,24

Simulação 5 - 2002/2003	
Velocidade do Vento	1,51
Taxa de Emissão (g/s)	
Forno 1	0,160
Forno2	0,138
S. Cubas Linha 1	0,0008
S. Cubas Linha 2N	0,0009
S. Cubas Linha 2S	0,0010
S. Cubas 2	0,0010
S. Cubas 3	0,0008
Resultado (ug/m3)	0,48

Simulação 3 - 2000	
Velocidade do Vento	1,79
Taxa de Emissão (g/s)	
Forno 1	0,060
Forno2	0,109
S. Cubas Linha 1	0,0009
S. Cubas Linha 2N	0,0010
S. Cubas Linha 2S	0,0009
S. Cubas 2	0,0010
S. Cubas 3	0,0010
Resultado (ug/m3)	0,27

Simulação 6 - 2004	
Velocidade do Vento	1,72
Taxa de Emissão (g/s)	
Forno 1	0,160
Forno2	0,138
S. Cubas Linha 1	0,0008
S. Cubas Linha 2N	0,0009
S. Cubas Linha 2S	0,0010
S. Cubas 2	0,0010
S. Cubas 3	0,0008
Resultado (ug/m3)	0,35

Simulação 4 - 2001	
Velocidade do Vento	1,60
Taxa de Emissão (g/s)	
Forno 1	0,248
Forno2	0,143
S. Cubas Linha 1	0,0021
S. Cubas Linha 2N	0,0006
S. Cubas Linha 2S	0,0011
S. Cubas 2	0,0009
S. Cubas 3	0,0007
Resultado (ug/m3)	0,36

Simulação 7 - 2005	
Velocidade do Vento	1,71
Taxa de Emissão (g/s)	
Forno 1	0,241
Forno2	0,139
S. Cubas Linha 1	0,0011
S. Cubas Linha 2N	0,875
S. Cubas Linha 2S	0,883
S. Cubas 2	0,0009
S. Cubas 3	0,0011
Resultado (ug/m3)	0,32

Simulação 8 - 2006	
Velocidade do Vento	1,65
Taxa de Emissão (g/s)	
Forno 1	0,450
Forno2	0,340
S. Cubas Linha 1	0,0015
S. Cubas Linha 2N	0,0013
S. Cubas Linha 2S	0,0013
S. Cubas 2	0,0013
S. Cubas 3	0,0014
Resultado (ug/m3)	0,48

Valores Constantes Utilizados nas Simulações Anteriores

1. Entrada de Dados dos Fornos de Cozimento de Anodos 1 e 2

Dados da Chaminé

Velocidade de saída dos gases na chaminé

$$U1 := 3.0$$

Temperatura de saída dos gases (K)

$$Ts := 469$$

Diâmetro da chaminé (m)

$$d := 4$$

Altura da chaminé (m)

$$H := 60$$

2. Entrada de Dados das Salas de Cubas

Dados Comuns as 3 Linhas

Altura da sala (m)

$$Hsc := 20$$

Largura das salas (m)

$$Wsc := 42$$

Dados Específicos da Linha 1

Temperatura de saída dos gases (K)

$$TsL1 := 313$$

Velocidade de saída (m/s)

$$UL1 := 1.48$$

Comprimento da Linha 1 (m)

$$LL1 := 750$$

Dados Específicos da Linha 2

Temperatura de saída dos gases (K)

$$TsL2 := 315$$

Velocidade de saída (m/s)

$$UL2 := 1.50$$

Comprimento da Linha 1 (m)

$$LL2 := 950$$

Dados Específicos da Linha 3

Temperatura de saída dos gases (K)

$$T_{sL3} := 315$$

Velocidade de saída (m/s)

$$UL3 := 1.1$$

Comprimento da Linha 3 (m)

$$LL3 := 69 \quad (\text{Comprimento da Linha antes da Expansão})$$

3. Entrada de Dados Meteorológicos e Constantes

Dados Meteorológicos

Temperatura ambiente (K)

$$T_a := 300.15$$

Classe de Estabilidade

P = 0.20 - Atmosfera Instável

P = 0.25 - Atmosfera Neutra

P = 0.30 - Atmosfera Estável

$$P := 0.3$$

Altura de medição do vento (estação meteorológica) (m)

$$Z1 := 10$$

Constantes

$$g1 := 9.8$$

$$\beta := 0.6$$

$$d\theta/dz := \begin{cases} 0.005 & \text{if } P = 0.20 \\ 0.010 & \text{if } P = 0.25 \\ 0.02 & \text{if } P = 0.30 \end{cases}$$

$$D := 200 \quad (\text{Altura Estimada da Inversão Térmica})$$

Coordenadas do Receptor em Relação ao Centro da Pluma

$$x := 1..280$$

$$y := 0$$

Referências Bibliográficas

- [1] - JOHR, H., **O Verde é Negócio**, 2ª ed., São Paulo, Editora Saraiva, 1994.
- [2] - MORAES, M. R., **Implementação de um Sistema de Modelos para Qualidade do Ar**, Universidade Federal de Santa Catarina - UFRG, Florianópolis, 2001.
- [3] - LORA E. E. S., **Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte**, 2ª ed., Editora Interciência, Rio de Janeiro, 2002.
- [4] - ARCHER, A. M. et all.; **Alumina to Aluminum: Bridging Two Process Streams**, Alcan International, 1996.
- [5] – SHREVE, R. N.; JR. J.A. B.; **Indústrias de Processos Químicos**, 4ª ed. – Rio de Janeiro, Editora Guanabara, 1997.
- [6] – NAGEN, N. F. et all.; **Ações para Entendimento e Redução das Emissões de Fluoreto Gasoso na Alumar**, XXIII Congresso Internacional do Alumínio – ABAL – Associação Brasileira do Alumínio, São Paulo, 2005.
- [7] – WORLD-ALUMINUM, <http://www.world-aluminum.org> . Acesso em Fev. 2007.
- [8] – CARVALHO, J. C., VILHENA, M. T., Solução da Equação de Langevin pelo Método iterativo de Picard. In: MOREIRA, D. M.; CARVALHO, J. C.; VILHENA, M. T., **Tópicos em Turbulência e Modelagem da Dispersão de Poluentes na Camada Limite Planetária**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRG, Porto Alegre, pg. 59-78, 2004.
- [9] - BOSANQUET, C. H., PEARSON, J. L., **The Spread of Smoke and Gases from Chimneys**, Trans. Faraday Society, v. 32, pg.1249, 1936.
- [10] – ARBAGE, M. C. A., DEGRAZIA, G. A., MORAES, O. L. L., **Simulação Euleriana da Dispersão Local da Pluma de Poluente Atmosférico de Candiota – RS**, Revista Brasileira de Meteorologia, v.21, n.2, pg.153-160, 2006.
- [11] - BOUBEL, R.W., FOX, D.L., TURNER, D.B. and SERN, A.C., **Fundamentals of Air Pollution**, Academic Press. Third Edition, pg. 323, 1994.
- [12] – LISBOA, H.M., **Controle da Poluição Atmosférica – ENS 5133**, Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2005.
- [13] – ENVIRONMENTHAMILTON, <<http://environmenthalmilton.org>>, Acesso em Fev/07.
- [14] – KAMS, **The Kwinana Air Modeling Study, Department of Conservation & Environment, Perth Western Austrália**, report 10, 1982.
- [15] - STERN, A. C., **Air Pollution**, vol. 1, 2ª ed., Academic Press, 1968.

- [16] - CARVALHO, J.C., **Um Estudo Numérico da Dispersão de Poluentes na Camada Limite Convectiva**, Dissertação de mestrado, Universidade de São Paulo - USP, São Paulo, 1996.
- [17] – LLOYD L. S.; JOSEPH S. S.; **Environmental Research & Technology Inc., Buoyant Line and Point Source (BLP) Dispersion Model User's Guide**, Document P-7304B, Concord, 1980.
- [18] – BOÇON, F. T., **Modelagem Matemática do Escoamento e da Dispersão de Poluentes na Microescala Atmosférica**, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 1998.
- [19] – ALUMAR, **Licença de Operação da Alumar 158/2004 GEMA – Gerência de Meio Ambiente do Estados do Maranhão**, São Luis, 2004.
- [20] – ALUMAR, **Estudo de Impacto Ambiental / Relatório de Impacto Ambiental – EIA/RIAM da Linha #3 da Redução da Alumar**, São Luis, 2003.
- [21] – ALUMAR, **Relatório de Monitoramento Ambiental da Alumar, SEMA1999, GAMA200, GAMA2001, SEMA 2002, SEMA 2003, SEMA 2004, SEMA 2005 e SEMA 2006**. São Luís, 2004.
- [22] - BUSKE, D., **Solução Analítica da Equação de Difusão-Advecção pelo Método GILTT Aplicada à Dispersão de Poluentes Atmosféricos**, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRG, Porto Alegre, 2004.
- [23] - CARVALHO, J. C., et al., **Lagrangian Stochastic Dispersion Modelling for the Simulation of the Release of Contaminants from Tall and Low Sources**, Meteorologische Zeitschrift, Stuttgart, v. 11, n.2, pg. 89-97, 2002.
- [24] - DEGRAZIA, G. A., MORAES, L. L. O., **Simulação Numérica da Dispersão de Poluentes em Camadas Limites Planetárias Convectiva e Estável**, Revista Brasileira de Meteorologia; 1989; v. 4, pg, 11, 275-287, 1989.
- [25] - LORERDO-SOURA, SCHETTINI, PALUCH., **Simulação da Camada Limite em Túnel de Vento**, IV Escola de Primavera de Transição e Turbulência, Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul - PUCRG, Porto Alegre, 2004.
- [26] - MORES & CEVEDO., **Camada Limite Planetária – Problemas com Medições e Interpretações de Dados**, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRG, Porto Alegre, 2004.
- [27] - PASQUILL. F., **The Estimation of the Dispersion of Windborne Material**, Meteorological Magazine, v. 90, pg. 33-49, 1961.