

APLICABILIDADE DO PROGRAMA DE MONITORAÇÃO METEOROLÓGICA  
DURANTE OPERAÇÃO NORMAL E DE ACIDENTES NAS INSTALAÇÕES DO  
CENTRO EXPERIMENTAL ARAMAR

Leslic de Molnary

*Comissão Nacional de Energia Nuclear  
Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares  
Cx.P. 11049 - CEP 05308-900 - São Paulo - Brazil*

Resumo

Este trabalho descreve o programa de meteorologia que está sendo desenvolvido pelo Centro Experimental Aramar do Ministério da Marinha, em Iperó (SP), para ser utilizado durante o projeto e licenciamento das instalações nucleares e químicas que compõem o ciclo do combustível nuclear e da planta do reator nuclear para propulsão naval. A continuidade deste programa de medidas meteorológicas estará assegurada a partir de sua incorporação ao programa de monitoração ambiental do sítio para auxiliar nas estimativas das concentrações atmosféricas devido aos efluentes gasosos que poderão ser liberados durante operação normal ou durante acidentes.

Abstract

This paper introduces the meteorological monitoring program that has been developed at Aramar Experimental Centre, Iperó (SP), by the Brazilian Navy to be used during design and licensing of the nuclear power reactor for naval propulsion, and the plants of the nuclear fuel cycle. The meteorological program will have its continuity inside the Aramar environmental monitoring program, estimating the atmospheric dispersion and concentration of radionuclides and chemical products that may be released to the atmosphere during routine operation or accidental condition.

1. Introdução

A atmosfera se constitui em uma das principais vias para o transporte de radionuclídeos e compostos químicos liberados no meio ambiente por um reator ou uma instalação do ciclo do combustível nuclear. Portanto, é necessário que a planta disponha de um sistema de coleta de informações meteorológicas adequado às condições observadas no local do empreendimento, de modo a permitir o acompanhamento da evolução temporal e espacial dos padrões meteorológicos locais, assim como, estimar os mecanismos de dispersão e remoção atmosférica; e os impactos radiológico e químico, decorrentes de uma liberação acidental ou de rotina, sobre as populações e o meio ambiente em torno da instalação considerada.

Para capacitar os técnicos e pesquisadores no acompanhamento da evolução das condições micrometeorológicas 'in-situ', a Coordenadoria para Projetos Especiais do Ministério da Marinha (COPEP/MM) tem investido na implantação de um programa de monitoração meteorológica adequado às futuras atividades do Centro Experimental Aramar (CEA), instalado

no município de Iperó (SP). Este programa de meteorologia é constituído basicamente por um sistema automático de coleta e tratamento de dados em uma torre instrumentada em três níveis, e por um programa de pesquisa entre a COPESP e o Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo (DCA/USP) visando estabelecer os padrões da circulação atmosférica de pequena escala e as características do transporte e difusão turbulenta em torno das regiões circunvizinhas ao CEA, através de experimentos meteorológicos de campo e modelos numéricos de computador.

2. Descrição do Programa de Medidas Meteorológicas 'In-Situ'

2.1. Torre Meteorológica

O sistema automático de coleta de dados meteorológicos em torre (SADAR) é constituído por sensores, transdutores, unidade de aquisição de dados, e microcomputador padrão IBM-PC. Os sensores estão instalados na torre meteorológica em três níveis (10 m, 60 m, e 80 m) e abrangem os parâmetros de velocidade e direção do vento, temperatura, diferencial de temperatura e umidade relativa. O sensor de precipitação pluviométrica está instalado na superfície.

Todo o sistema de meteorologia em torre foi especificado para atender às exigências do Regulatory Guide 1.23 /1/ e CNEN NE-1.22 /2/ com relação a precisão e confiabilidade das medidas, assim como, apresentar um índice de disponibilidade mínima de 90 % para cada um dos sensores e componentes do sistema. A aquisição automática de dados redundantes é efetuada através de outra unidade de aquisição de dados e microcomputador conectados em paralelo com o sistema principal. A Figura 1 apresenta uma esquematização do sistema de meteorologia em torre atualmente implementado no CEA.

Além disso, podem ser destacados os seguintes critérios de projeto: os equipamentos são constituídos por módulos padronizados do tipo árvores para encaixe, e montados em bastidor a fim de facilitar a manutenção e expansão, os equipamentos eletrônicos (condicionadores e transmissores) sujeitos à intempérie estão instalados em caixas à prova de tempo adverso. Foram reservadas 2 interfaces RS232C adicionais para possibilitar a comunicação entre o microcomputador do sistema SADAR e os usuários do sistema, via modem, transmitindo os dados meteorológicos à distância através de linha telefônica ou cabo coaxial.

Os valores máximos, mínimos e médios de cada parâmetro meteorológico são obtidos em função dos valores reportados a cada intervalo de 3 segundos durante um período de 15 minutos (aproximadamente 300 aquisições/15 minutos) para todos os sensores. Após este intervalo de 15 minutos, os dados armazenados na unidade de aquisição de dados são transferidos para a memória do microcomputador onde são processados e atualizados no arquivo diário. Durante o período de 24 horas o arquivo diário apresentará 96 valores máximos, médios, e mínimos de 15 minutos para cada parâmetro meteorológico amostrado na torre, e o total acumulado a cada 15 minutos no caso da precipitação pluviométrica.

Posteriormente, os arquivos de dados diários sofrem uma verificação através de rotinas de consistência, e finalmente são incorporados ao banco de dados meteorológicos do sítio onde serão utilizados nas áreas técnicas operacionais como, p.ex., os operadores da sala de controle do reator, o grupo de monitoração ambiental e radiológica do Laboratório Radioecológico (LARE), e o grupo de planejamento de emergência do sítio, como também, pelos técnicos de licenciamento que demandam informações meteorológicas em suas atividades. A Figura 2 apresenta um esquema do fluxo de informações meteorológicas do CEA desde a coleta de dados pelos sensores instalados na torre do CEA até a atualização do banco de dados meteorológicos do sítio e disseminação para os usuários.

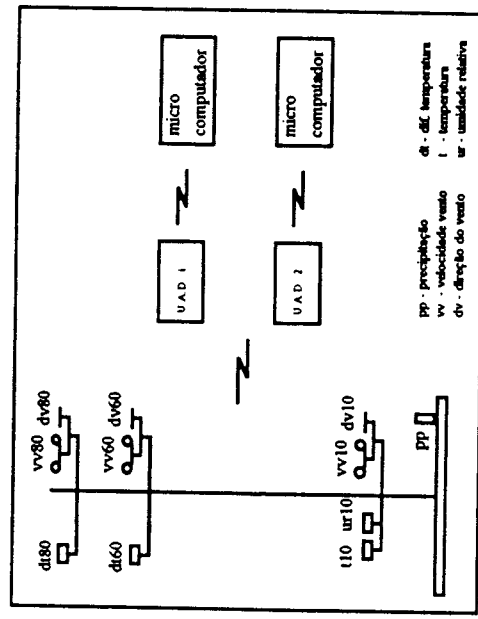


Figura 1. Esquematização do sistema de aquisição de dados meteorológicos em torre implantado no Centro Experimental Aramar. Os níveis instrumentados da torre meteorológica estão a 10 m, 60 m, e 80 m. O sensor de precipitação está instalado próximo a base da torre.

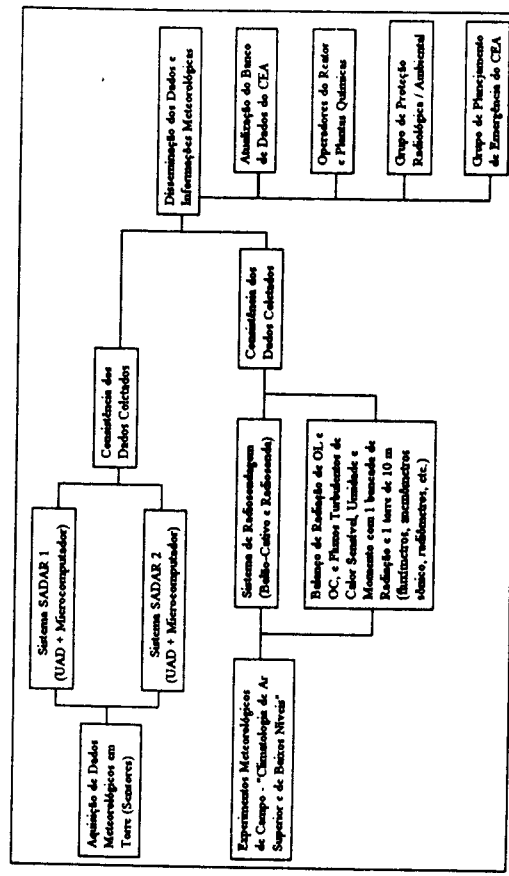


Figura 2. Fluxo das informações e dados meteorológicos coletados dentro do programa de monitoração ambiental do Centro Experimental Aramar. Os dados meteorológicos da torre são coletados de maneira ininterrupta durante as 24 horas do dia, enquanto que, os dados coletados durante os experimentos são relativos aos períodos de duração das campanhas de campo.

## 2.2. Experimentos Meteorológicos de Campo

A necessidade de informações a respeito das características climatológicas e dos fenômenos meteorológicos de escala local predominantes sobre a região do Centro Experimental Aramar para fins de elaboração do Relatório de Impacto Ambiental (RIMA), do Relatório de Análise de Local (RAL), e do Relatório de Análise de Segurança (RAS) da planta do reator para propulsão naval, e das plantas do ciclo do combustível nuclear, conforme exigências do Regulatory Guide 1.23/11, CNEN-NE 1.22/2, Regulatory Guide 1.70/3, e Regulatory Guide 4.9/4, determinou a concepção e realização de uma série de experimentos meteorológicos de campo para caracterizar a circulação local, em adição às medidas efetuadas com a torre meteorológica instalada no sítio.

Este programa experimental foi denominado "Climatologia de Ar Superior e de Baixos Níveis", e teve por principal objetivo caracterizar a capacidade da dispersão atmosférica de poluentes em função dos diversos sistemas de mesoescala e de grande escala que podem ser observados durante o decorrer do dia e ao longo do ano. Entre o período de Julho/1990 a Março/1993 foram realizadas 5 (cinco) campanhas de campo, onde efetuaram-se sondagens dos perfis verticais das primeiras centenas de metros da superfície, assim como, foi estimado o balanço de energia próximo a superfície. A Tabela 1 apresenta os períodos de realização das campanhas de campo, os principais sensores e equipamentos utilizados, e as instituições de ensino e pesquisa participantes durante este período.

As campanhas experimentais possibilitaram também a estimativa de alguns parâmetros de entrada que são utilizados na inicialização de um grande número de códigos computacionais que modelam a dispersão atmosférica de radionuclídeos e o cálculo de doses no meio ambiente para diversos caminhos de exposição entre o ponto de liberação na atmosfera e possíveis receptores (ARDOS/5, CRAC/6, Molnary/7). Entre os parâmetros estimados podem ser ressaltados a evolução temporal da altura da camada limite planetária, o fluxo turbulento de calor sensível, a evolução diária da estrutura vertical da temperatura, velocidade e direção do vento, e a rugosidade de superfície.

A análise e consistência dos dados coletados durante todas as fases de experimentos estiveram sob responsabilidade da COPEP e do DCA/USP. A COPEP esteve responsável pelo tratamento dos dados coletados pelo sistema de radiosondagem (balão-cativo/radiosonda), enquanto que, o DCA/USP esteve responsável pelo tratamento dos dados coletados através dos sistemas de anemômetro sônico, sensores de radiação solar e sensores de superfície. Uma descrição das campanhas experimentais de campo, das técnicas de amostragem empregadas, e dos resultados preliminares para os Experimentos Meteorológicos I e II são apresentados por Oliveira e Sakai/8, Molnary/9, Molnary e Oliveira/10 e Oliveira/11.

A Figura 3 apresenta uma sondagem com balão-cativo sendo realizada durante o período da manhã nas dependências do LARE/CEA (Experimento Meteorológico I). Um exemplo da evolução temporal da camada limite planetária (CLP) para este período de experimento é apresentado na Figura 4. O padrão de evolução diária da CLP na região é caracterizado, sob condição de subsidência intensa e passagem de sistemas anticiclônicos, por alturas que chegam a atingir os 1000 m durante o período diurno, enquanto que, durante a noite a altura da camada estável está entre 100 e 200 m. Também é comum a ocorrência de jatos noturnos de baixos níveis entre os níveis de 200 e 400 m, com velocidades do vento da ordem de 6 a 10 m/s, sendo que, já foram observadas velocidades superiores a 14 m/s (dia 05/08/90, às 00 hora local).

O fato destes padrões terem sido observados durante todos os experimentos realizados pode indicar a existência de um padrão médio de evolução diária da CLP, entretanto, os experimentos foram realizados em épocas específicas e com curta duração temporal, neste caso

a continuidade deste projeto de pesquisa mostra-se necessária, e se possível, com a implementação de medidas de concentração ambiental com a liberação de 'tracer'.

Tabela 1. Sumário dos Experimentos Meteorológicos de Campo realizados no Centro Experimental Aramar (CEA) durante o período de Julho/1990 a Março/1993.

Experimento Meteorológico	Período Realização	Sondagem Balão-Cativo/Radiosonda	Torre Micro-meteorológica	Bacada Radiação	Instituição Participante (1)
I	27/07 a 09/08 de 1990	63 / 32	---	---	COPEP DCA/USP
II	11/03 a 22/03 de 1991	86 / --	1 anemômetro sônico 1 higrômetro de Krypton	1 piranômetro 1 radiômetro líquido 1 penelômetro 1 fluxímetro de calor	COPEP DCA/USP IPMe/UNESP UFVJ
III	09/03 a 25/03 de 1992	31 / 10	3 anemômetros sônicos 3 higrômetros de Krypton 1 anemômetro Gill 1 sensor de direção 3 temperaturas 3 umidades	1 piranômetro 1 radiômetro líquido 1 penelômetro 1 piugômetro 2 fluxímetros de calor 1 fluxímetro de umidade 3 temperaturas de solo	COPEP DCA/USP IPMe/UNESP UFSM, UFRS UFPA, CNEN
IV	27/07 a 08/08 de 1992	57 / --	idem ao Exp. Met. III	idem ao Exp. Met. III	COPEP DCA/USP IPMe/UNESP UFSM, UFRS UFVJ
V	08/03 a 20/03 de 1993	105 / 07	3 anemômetros sônicos 3 higrômetros de Krypton 2 anemômetros Gill 3 temperaturas 3 umidades	idem ao Exp. Met. III	COPEP DCA/USP IPMe/UNESP UFSM, UFVJ

(1) COPEP: Coordenadoria para Projetos Especiais, DCA/USP: Departamento de Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo  
IPMe/UNESP: Instituto de Pesquisas Meteorológicas da Universidade Estadual Paulista, UFSM: Universidade Federal de Santa Maria  
UFRS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, UFPA: Universidade Federal do Pará, UFVJ: Universidade Federal de Vitória  
CNEN: Comissão Nacional de Energia Nuclear.



Figura 3. Sondagem com o sistema de balão-cativo sendo realizada durante o amanhecer do dia 03/08/1990 do Experimento Meteorológico I, realizado no Centro Experimental Aramar.

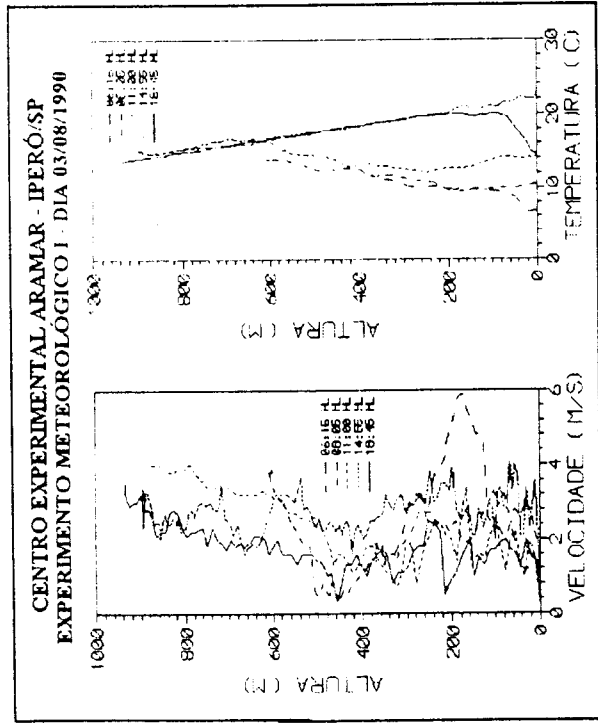


Figura 4. Evolução temporal dos perfis verticais da velocidade do vento e temperatura do ar observados durante o dia 03/08/1990 do Experimento Meteorológico I realizado no CEA. Os horários são relativos às sondagens das 06:15, 08:05, 11:00, 14:55 e 18:45 horas locais.

3. Integração do Programa de Medidas Meteorológicas ao Desenvolvimento de Modelos de Dispersão Atmosférica Específicos para o Sítio

O acoplamento dos mecanismos de transporte atmosférico (turbulento e advectivo) aos processos de transformação radioativa e de reação química formam a ligação fundamental entre as taxas de emissão e as doses ou concentrações no meio ambiente, de modo que, o gerenciamento da qualidade do ar através da avaliação do impacto ambiental de um determinado poluente, envolve necessariamente algumas considerações dos processos físico-químicos que ocorrem entre o intervalo de liberação do poluente até o seu meio receptor.

As medidas diretas de campo da concentração ambiental de poluentes é um dos métodos para se estabelecer as relações entre os níveis ambientais e os devidos à liberação, desta maneira, as medidas diretas são a melhor maneira para se obter o registro verdadeiro causado pelos mecanismos atmosféricos sobre a dispersão dos materiais liberados. Contudo, muitas vezes medidas diretas das concentrações ambientais não são tecnicamente factíveis, pois o custo operacional, especialmente sobre grandes escalas espaciais e longos períodos de tempo, se torna proibitivo.

Por outro lado, a avaliação da qualidade do ar através de um modelo computacional, para a área potencialmente afetada pela liberação e condição meteorológica observada, durante e após o acidente ou liberação de rotina, tem um custo relativamente menor do que as medidas diretas no campo.

Atualmente a análise probabilística de risco é largamente utilizada na indústria nuclear para determinar se as instalações são adequadamente seguras, assim como, o método também é utilizado em alguns aspectos do planejamento de emergência e estudos de avaliação de sítios. Entretanto, quando são avaliadas as consequências das liberações acidentais ou de rotina na atmosfera, os modelos de dispersão atmosférica ainda são necessários para se avaliar os caminhos de exposição e as consequências à saúde do homem devido às doses recebidas.

Desta maneira, o cálculo das consequências de liberações acidentais hipotéticas de material radioativo ou químico na atmosfera constitui-se em um dos parâmetros essenciais para a determinação da aceitabilidade dos sítios e instalações nucleares propostos, como também, os cálculos das consequências de liberações rotineiras auxiliam o grupo de monitoração ambiental e radiológica da instalação no acompanhamento das operações da instalação e seu respectivo impacto ambiental operacional no meio ambiente circunvizinho.

Os modelos de transporte e difusão atmosférica que a COPEP está utilizando para o licenciamento de suas instalações no CEA estão baseados nas metodologias sugeridas pelos órgãos licenciadores, que por sua vez, são pequenas variações ou adaptações do modelo de pluma gaussiana.

Para avaliar as consequências devido aos acidentes postulados são adotados os modelos de dispersão atmosférica do Regulatory Guide 1.145 /12/, onde são avaliados as doses ou concentrações para os limites da área de exclusão do sítio e para os limites da zona de baixa população para todas as condições de dispersão atmosférica esperadas ocorrerem no sítio durante a vida útil da instalação. Para avaliar as consequências ambientais da liberação de efluentes na atmosfera durante operação normal durante o decorrer de um ano, são utilizados os modelos sugeridos no Regulatory Guide 1.111 /13/ e Safety Series 50-SG-S3 /14/.

A Figura 5 apresenta um esquema de como o programa de medidas meteorológicas do CEA em conjunto com os modelos de dispersão atmosférica podem auxiliar nas avaliações das consequências sobre meio ambiente e populações circunvizinhas ao sítio. Este esquema pode ser aplicado tanto para as estimativas de liberações acidentais hipotéticas e para liberações acidentais. A única observação a ser mencionada refere-se ao papel desempenhado pelo

módulo 'CONTRA MEDIDAS', uma vez que, para cada uma das três situações que se apresentam as medidas mitigadoras são diferentes.

No caso das avaliações probabilísticas de risco, ou seja, durante a fase de projeto das instalações, os modelos de dispersão atmosférica auxiliam, p. ex., fornecendo informações para o aperfeiçoamento dos sistemas de tratamento de efluentes e de ventilação das instalações; e para a estruturação do programa de emergência do sítio. No caso operacional, os modelos serão utilizados para auxiliar os operadores das instalações na definição das situações mais favoráveis para a liberação dos efluentes gasosos, e finalmente, no caso de acidente com liberação atmosférica, os modelos poderão ser utilizados para estimar as consequências radiológicas e ambientais nas regiões circunvizinhas ao CEA, e auxiliar na implementação das medidas de emergência mitigadoras.

A Figura 6 apresenta a reprodução da tela do monitor de um microcomputador em que é simulado a liberação de um poluente por uma das instalações que integram o complexo do CEA, assumindo o modelo de pluma gaussiana com liberação contínua de uma fonte pontual. O termo-fonte e as condições meteorológicas assumidas na simulação são hipotéticas. Na Figura 6 também é apresentado a distribuição dos centros populacionais e principais vias de transporte rodoviário e aquático em torno do CEA.

O acoplamento das informações meteorológicas e características da distribuição espacial da concentração da pluma com as informações demográficas permite que sejam projetadas as doses na população quando de uma liberação atmosférica rotineira ou em acidentes, assim como, tomadas as medidas mitigadoras pelos grupos de monitoração ambiental ou de planejamento de emergência do sítio.

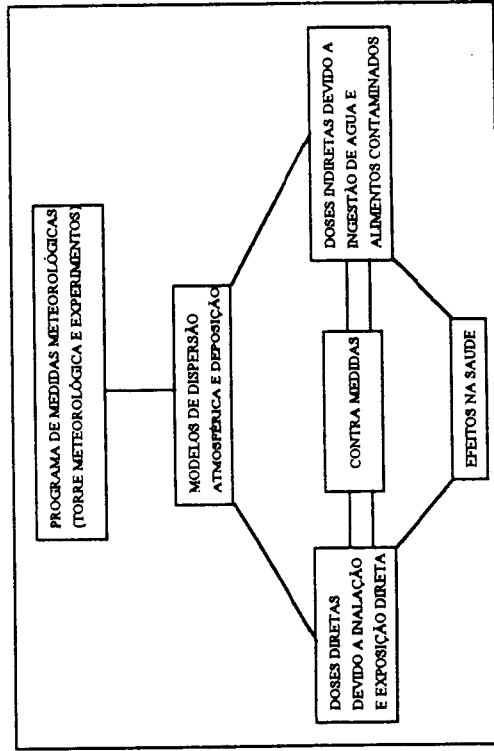


Figura 5. Interação do programa de medidas meteorológicas do CEA como fonte de dados para a alimentação dos modelos de dispersão atmosférica que irão auxiliar na definição das contra medidas para diminuir os efeitos na saúde do homem devido à liberações na atmosfera durante operação acidental ou de acidentes.

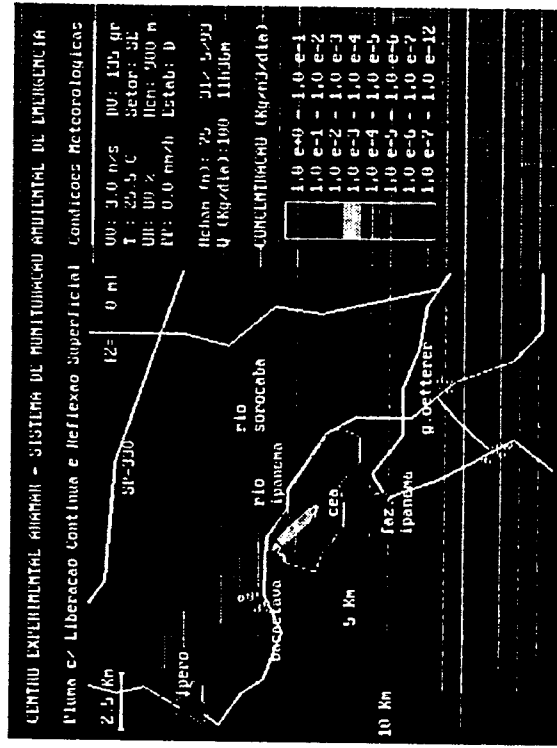


Figura 6. Representação da distribuição espacial da concentração ao nível do solo assumindo-se uma fonte elevada e contínua localizada no CEA. Os dados meteorológicos e a intensidade do termo-fonte são utilizados apenas para fins de apresentação. É utilizado o modelo de pluma gaussiana para liberação contínua e reflexão superficial.

4. Conclusões

Este trabalho apresentou uma visualização do programa de medidas meteorológicas que vem sendo implementado pela COPEP/MM no Centro Experimental Aramar com a finalidade de auxiliar no desenvolvimento dos projetos e do licenciamento das instalações do ciclo do combustível nuclear e da planta do reator nuclear para propulsão naval, assim como, complementar o programa de monitoração ambiental operacional e de emergência do sítio.

Do ponto de vista funcional o programa de medidas atende as exigências normativas para instalações nucleares, e ao mesmo tempo, procura introduzir um projeto de pesquisa acadêmica de médio e longo prazo na área de experimentos meteorológicos de campo, e de modelagem numérica da dispersão atmosférica de radionuclídeos e compostos químicos com o objetivo de desenvolver modelos específicos para a região do CEA.

5. Agradecimentos

A COPEP/MM pela permissão de reproduzir o local do experimento meteorológico I e os dados da sondagem com balão-cativo, e ao DCA/USP pela co-participação nos trabalhos de campo e divulgação das atividades de pesquisas meteorológicas desenvolvidas no Centro Experimental Aramar, em Iperó (SP).

## 6. Referências

- 1/ U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION "Proposed Revision 1 to Regulatory Guide 1.23 - Onsite Meteorological Programs". Washington, D.C. 1980. (Regulatory Guide 1.23).
- 2/ COMISSÃO NACIONAL DE ENERGIA NUCLEAR. "Programa de Meteorologia de Apoio de Usinas Nucleo-elétricas". Rio de Janeiro, Brasil. 1989. (CNEEN-NE 1.22).
- 3/ U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION "Standard Format and Content of Safety Analysis for Nuclear Power Plants". Washington, D.C. 1978. (Regulatory Guide 1.70 Rev. 3).
- 4/ U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION "Preparation of Environmental Reports for Commercial Uranium Enrichment Facilities". Washington, D.C. 1975. (Regulatory Guide 4.9 Rev. 1).
- 5/ MOORE, R.E., C.F. BAES, L.M. McDOWELL-BOYER, A.P. WATSON, F.O. HOFFMAN, J.C. PLEASANT, C.W. MILLER. "AIRDOSE-EPA Computerized Methodology for Estimating Environmental Concentrations and Doses to Man from Airborne Releases of Radionuclides". Oak Ridge National Laboratories, Oak Ridge, Tennessee. 1979. (ORNL-5532).
- 6/ RITCHIE, et. al. "CRAC-2 Model Description". Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico. 1984. (SAND82-0342).
- 7/ MOLNARY, L. "Caracterização de Um Modelo de Camada Limite Planetária para Avaliar Liberações de Radionuclídeos em Instalações Nucleares". Dissertação de Mestrado. Instituto Astronômico e Geofísico da Universidade de São Paulo. 1993.
- 8/ OLIVEIRA, A.P., R.K. SAKAI. "Dinâmica da Camada Limite Planetária em Latitudes Tropicais e Subtropicais". Relatório Técnico do Instituto Astronômico e Geofísico, Universidade de São Paulo. São Paulo 1991.
- 9/ MOLNARY, L. "Análise Preliminar de Resultados e Descrição do Experimento Meteorológico I e II realizados no Centro Experimental Aramar". Anais do IV Congresso Geral de Energia Nuclear, v.2. 539-545. Rio de Janeiro, Brasil. 1992.
- 10/ MOLNARY, L., A.P. OLIVEIRA. "Evolução Temporal da Camada Limite Planetária em Iperó (SP) durante o Experimento Meteorológico de Campo I e II - Comparação entre Modelo Numérico e Observações". Anais do VII Congresso Brasileiro de Meteorologia, v.2. 437-441. São Paulo, Brasil. 1992.
- 11/ OLIVEIRA, A.P. "Medidas de Turbulência Efetuadas em Iperó (SP) em Março de 1991". Anais do VII Congresso Brasileiro de Meteorologia, v.2. 450-453. São Paulo, Brasil. 1992.
- 12/ U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. "Atmospheric Dispersion Models for Potential Accident Consequence Assessment at Nuclear Power Plants". Washington, D.C. 1982. (Regulatory Guide 1.145 Rev 1)
- 13/ U.S. NUCLEAR REGULATORY COMMISSION. "Methods for Estimating Atmospheric Transport and Dispersion of Gaseous Effluents in Routine Releases from Light-Water-Cooled Reactors". Washington, D.C. 1977. (Regulatory Guide 1.111 Rev.1).
- 14/ INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY. "Atmospheric Dispersion in Nuclear Power Plant Siting. Safety Guide". Viena. 1980. (Safety Series 50-SG-S3).

# THE RHODE ISLAND NUCLEAR PREPAREDNESS PROGRAM—A JOINT INITIATIVE OF INDUSTRY, STATE, AND ACADEMIA

Monitoring ingestion-pathway radioactivity in a nuclear emergency and the natural environment during other times

Paper PIII.14 of the LAS/ANS Symposium  
"Nuclear Energy and the Environment"  
Rio de Janeiro, 27 June-1 July 1993

Kenneth A. Rahn, Professor  
Douglas Cullen, Research Specialist  
Urszula Tomza, Research Specialist  
Graduate School of Oceanography  
University of Rhode Island  
Narragansett, Rhode Island, USA 02882-1197

Terry Tehan, Director  
Ninni Jacob, Radiation Safety Officer  
Rhode Island Nuclear Science Center  
South Ferry Road  
Narragansett, Rhode Island, USA 02882