

BR8922375
ENIS-BR--1787



**III Congresso Brasileiro de Defesa
do Meio Ambiente**

24/7 a 28/7 de 1989

Rio de Janeiro

UFRJ

**"A IMPORTÂNCIA DOS MODELOS FÍSICOS E MATEMÁTICOS NO
ESTUDO DE LOCALIZAÇÃO DE USINAS NUCLEARES"**

ENGº JORGE LUIZ PAES RIOS

Engenheiro do Deptº de Hidroengenharia da ENGEVIX S.A.

Prof. Titular da Universidade Católica de Petrópolis

Prof. Convidado da Universidade do Porto-Portugal

RESUMO

O presente trabalho salienta a importância do estudo dos lançamentos dos efluentes na seleção dos locais para a implantação de Usinas Nucleares e apresenta os principais métodos de análise disponíveis que são os modelos físicos e matemáticos, classificando-os e informando sobre a utilidade de cada tipo de modelo.

Apresenta-se finalmente um programa para a escolha do local de implantação de uma Usina e os estudos envolvidos em suas diversas etapas.

O autor contou com a colaboração do Prof. René Bonnefille (da SOFRATOME e da École Nationale Supérieure de Techniques Avancées - ENSTA) na revisão final do texto a quem agradece.

- IMPORTÂNCIA DO EFLUENTE NA SELEÇÃO DE LOCAIS PARA IMPLANTAÇÃO DE USINAS NUCLEARES

Os estudos necessários à seleção de local para implantação de uma Usina Nuclear são, em princípio, do mesmo gênero daqueles para os centros industriais comuns, isto é, tem-se que levar em consideração as trocas que se estabelecem entre a instalação e o meio ambiente. No caso de uma usina térmica estas trocas com o ambiente a considerar são:

- Eletricidade
- Calor
- Água
- Materiais combustíveis, e
- Despejos.

Para a escolha da localização das usinas térmicas convencionais predomina, em importância, o fluxo de combustíveis juntamente com o fluxo de eletricidade.

O transporte de eletricidade a longas distâncias sendo caro (perdas, etc...), a escolha fica na dependência de um balanço econômico entre este transporte e o transporte de combustíveis. Vários fatores entram em jogo dependendo do tipo da usina (carvão ou óleo combustível).

No caso das usinas nucleares, como o combustível é altamente concentrado, o problema se torna diferente. Assim, por exemplo, um reator de 1000 MW contém cerca de 90 toneladas de urânio enriquecido que permanece em média 3 anos no reator. A renovação anual de 1/3 do combustível conduz, portanto, a um fluxo de 30 toneladas por ano, que perfaz 90 toneladas/ano com o acondicionamento. Esta mesma produção de eletricidade implicaria num fluxo de óleo combustível pesado de 1,5 milhões de toneladas/ano e de um fluxo de carvão (de qualidade média) de 2,5 milhões de toneladas/ano. Neste último caso ter-se-ia quatro trens de 2500 toneladas por dia para alimentar a usina.

A comparação dos fluxos de saída também é importante. A usina nuclear acima implicaria na saída anual de 30 toneladas de combustível irradiado (600 toneladas/ano com o acondicionamento) e mais 240 toneladas de despejos sólidos de baixa atividade. A usina convencional a óleo emitiria na atmosfera cerca de 600 toneladas/ano de despejos sólidos e a usina a carvão produziria cerca de 350.000 toneladas/ano de cinzas.

A localização das usinas nucleares, portanto, não depende tanto do transporte de combustível quanto as usinas térmicas convencionais. A localização das usinas nucleares dependerá principalmente do fluxo de eletricidade e do fluxo de calor com o meio ambiente. Se não houvesse nenhuma restrição devido aos efeitos do fluxo térmico, a localiza

ção ideal, tendo em vista apenas o transporte de eletricidade, seria, portanto, o baricentro das zonas de consumo servidas. Todavia, tem-se que levar em consideração os efeitos do fluxo de calor lançado no meio ambiente, uma vez que grandes quantidades de água são utilizadas na refrigeração das usinas atômicas.

Deve-se notar que 2/3 da energia é transformada em calor e apenas 1/3 é aproveitada como energia elétrica. Portanto, o fluxo de calor representa o dobro do fluxo elétrico, daí resultando sua importância em termos quantitativos. Para se ter noção da ordem de grandeza do problema poderia ser mencionado o fato de que as vazões do efluente térmico são, muitas vezes, da ordem de 50 a 200 m³/s. Sob o ponto de vista qualitativo deve-se citar o fato de que uma recirculação do efluente térmico, apresentando curto-circuitos hidráulicos, levaria a uma diminuição do rendimento da usina e ainda que o impacto ecológico deve ser avaliado e levado em consideração.

A localização da usina nuclear é função, portanto, da disponibilidade de água para a refrigeração e de um local onde a diluição desta água possa ser efetuada (dispersão das calorias), acusando pouco impacto na ecologia regional. A construção de centrais térmicas nas margens dos rios, por exemplo, levaria a diminuição do oxigênio de saturação do curso d'água, podendo causar grande impacto ecológico (poluição térmica), uma vez que a descarga do efluente pode ultrapassar muitas vezes a vazão de estiagem do curso d'água.

Evidentemente que existem uma série de outros critérios a serem considerados, mas a sua consideração é inútil se o critério do lançamento do efluente não for atendido. Pode-se citar, entre outros critérios a serem considerados (sob o ponto de vista de segurança de funcionamento e de impacto sobre o ambiente), o impacto dos efluentes gasosos sobre a flora e fauna e as cadeias alimentares e os perigos de queda de aeronaves.

Outros critérios técnicos também podem ser citados, como a qualidade do solo para as fundações, sendo, portanto, critério do lançamento do despejo térmico necessário, mas não suficiente.

Em resumo, pode-se afirmar que a localização de uma usina nuclear depende de três requisitos importantes:

- Segurança
- Meio ambiente; e
- Condições Sócio-econômicas.

Em termos de meio ambiente devem ser fixados limites de aceitabilidade (temperatura da água, emissão de gases, ruído, etc), para cada local, considerando-se as características próprias (zona industrial, zona de pesca, zona

turística, etc...). Aplicando-se os modelos respectivos para cada tipo de estudo os locais serão aceitos ou rejeitados em função dos resultados.

MÉTODOS DE ANÁLISE

Além dos modelos meramente conceituais, que facilitam e norteiam a compreensão e a visualização dos fenômenos naturais intervenientes, dois métodos podem servir de instrumento determinístico, para o estudo da qualidade das águas fluviais, estuariais e/ou costeiras. Esses métodos, de simulação, resumem-se nos modelos matemáticos e físicos.

Poder-se-ia considerar que estes tipos de modelos fossem exclusivos conforme o caso a estudar, isto é, que a aplicação de um excluía o emprego do outro. Todavia, devido à complexidade dos problemas, a escolha nem sempre é fácil, devendo-se, muitas vezes, recorrer aos dois métodos para que se possa chegar a soluções aceitáveis. Os dois tipos podem, portanto, se complementar na obtenção dos resultados ou, em certos casos, o modelo físico pode servir de referência para a calibração do modelo matemático como, por exemplo, nos estudos de jato (modelos semi-empíricos).

Os modelos matemáticos representam os fenômenos da natureza por meio de equações. Estas equações matemáticas dos fenômenos físicos são, em alguns casos, de difícil representação e solução; além disto necessitam seguidamente do uso de coeficientes desconhecidos que deverão ser medidos na natureza ou em modelos físicos. Como a resolução das equações completas nem sempre é possível, faz-se necessário desprezar certos termos e ainda formular hipóteses sobre a distribuição espacial de certas grandezas (modelos integrais) ou então discretizar o espaço e o tempo (modelos numéricos). Estes modelos podem ser uni, bi e tridimensionais. A escolha das hipóteses simplificadoras e do tipo de modelo é fundamental para a validade dos resultados obtidos.

Os modelos físicos têm a vantagem de não apresentarem uma discretização do problema, pois este é contínuo e pode ter uma representação geométrica tridimensional sem dificuldades.

Deve-se ainda mencionar a existência de modelos híbridos que, apesar de possuírem custos iniciais elevados, se apresentam como uma solução para reduzir os custos de operações devido à sua grande flexibilidade, pois permitem, em curto espaço de tempo, a realização de vários ensaios. Tratam-se basicamente de modelos físicos comandados por computadores. Isto significa que um computador pode fornecer as condições de funcionamento ao modelo físico através de programas, as quais podem ser obtidos no prototipo ou resultados de modelos matemáticos já aferidos.

3 - CLASSIFICAÇÃO DOS MODELOS SEGUNDO A SUA EXTENSÃO

Pode-se, pois, classificar os modelos (físicos e matemáticos) segundo a sua extensão em:

- Modelos gerais ou de grandes áreas
- Modelos regionais ou de zona afastada
- Modelos locais ou de zona intermediária
- Modelos de jato ou de zona próxima
- Modelos de estruturas

3.1 - MODELOS GERAIS OU DE GRANDES ÁREAS

Os modelos gerais (100 a 1000 km de largura e/ou comprimento) abrangem áreas bem grandes e evidentemente não possuem grande precisão, mas seus resultados podem servir de base para estudos mais detalhados e para o fornecimento das condições de fronteira para os modelos regionais.

Estes modelos são baseados na resolução numérica das equações de Saint-Venant por um método explícito de diferenças finitas (curvas características). As correntes de marés são calculadas em nós (das malhas de cálculos) distantes 10 km um do outro. Anteriormente, porém, foi construído um modelo físico do Canal da Mancha (no Institut de Mécanique de Grenoble). Devido à importância da força de Coriolis na mecânica do fenômeno, foi necessário fazer um modelo giratório ("plaque tournante").

3.2 - MODELOS REGIONAIS OU DE ZONA AFASTADA

Os modelos regionais abrangem áreas com 10 a 100 km de largura e/ou comprimento.

Nos modelos matemáticos regionais utilizam-se tanto o método explícito como o implícito para o cálculo das correntes de marés e a ordem de grandeza da malha de cálculo é de 1,0 km. Os resultados obtidos podem ser usados nos modelos locais.

A exploração do modelo físico também é, geralmente, mais trabalhosa do que a do modelo matemático e evidentemente tem-se que levar em consideração ainda os efeitos de escala. Os fenômenos da degradação (térmica, radioativa, etc.) são de difícil reprodução nos modelos físicos. Os modelos físicos são recomendados, nesta escala, principalmente nos casos onde o fundo apresenta pouca inclinação (deixando grande área descoberta em maré baixa), uma vez que a representação em modelos matemáticos fica mais difícil. Os modelos físicos nesta escala são sempre distorcidos.

3.3 - MODELOS LOCAIS OU DE ZONA INTERMEDIÁRIA

Os modelos locais são elaborados para cada estudo em particular e abrangem áreas bem mais restritas (1 a 10 km de extensão apenas).

Nos modelos matemáticos locais, para o cálculo das correntes de mares, utiliza-se, geralmente, o método implícito (passo fracionário) para a resolução das equações de Saint-Venant. A dimensão de malha de cálculo vai depender da precisão desejada e sua aplicação é bem trabalhosa.

Os modelos físicos locais podem ser distorcidos ou sem distorção. Para os estudos de posição da tomada d'água e da mancha térmica eles não devem ter distorção. Todavia, nos importantes estudos da recirculação da água (na refrigeração de uma Central Térmica, por exemplo) o modelo distorcido apresenta resultados mais próximos da realidade, enquanto os modelos sem distorção apresentam resultados mais otimistas, isto é, contra a segurança.

3.4 - MODELOS DE JATOS OU DE ZONA PRÓXIMA

Os modelos de jatos podem estudar os lançamentos e os efeitos de dispersão (temperaturas, poluentes conservativos ou não), com ou sem correntes (mares, lagos, estuários, etc.).

Os modelos matemáticos de jato podem ser classificados, segundo alguns autores, em modelos pontuais (tridimensionais) e modelos integrais (unidimensionais, bidimensionais e semi-empíricos).

Num lançamento de Usina Térmica no mar, onde as correntes são fracas (10 a 20 cm/s), e, portanto, não permitem uma homogeneização na vertical ou no estudo da diluição inicial do próprio jato (mesmo no caso de mar com correntes de mares), o problema é tridimensional e ainda deve ser considerada a influência do vento na superfície líquida que altera a posição do jato.

No caso em que se pode supor que a distribuição das velocidades do jato se faz segundo a curva de Gauss pode-se ter um modelo unidimensional ou bidimensional. No caso dos modelos matemáticos tridimensionais, para cálculo da velocidade e da temperatura em cada ponto de um jato sujeito a correntes transversais, por exemplo, não é mais possível fazer a hipótese da distribuição das temperaturas e velocidades segundo a curva de Gauss e, resolvendo-se as equações da mecânica dos fluidos e do transporte de calor, pode-se conseguir um modelo bem representativo do fenômeno real.

5 - MODELOS DE ESTRUTURAS

Os modelos de estruturas são empregados para resolver os problemas de Engenharia Civil e Hidráulica apresentados pelas obras e estruturas (tomadas d'água, lançamentos dos efluentes, etc). Esses modelos servem, por exemplo, para determinar a cota das plataformas de usinas térmicas, a fim de evitar a submersão das mesmas. A estabilidade e a eficiência de proteções contra erosões também são estudadas com auxílio desses modelos, assim como o são as solicitações e os esforços aos quais as ondas submetem as estruturas a elas expostas. Os estudos de refração e difração de ondas, a forma de difusores, as possíveis rupturas de equilíbrios sedimentares provocadas pela implantação de obras à beira-mar ou em rios, são outros exemplos de emprego de modelos de estruturas que tanto podem ser matemáticos como físicos, de acordo com a natureza dos fenômenos em jogo.

- PRINCIPAIS ESTUDOS EM MODELOS NECESSÁRIOS PARA A IMPLANTAÇÃO DE USINAS NUCLEARES

A implantação de instalações industriais de grande porte em zonas costeiras necessita de vários estudos hidráulicos não só no que diz respeito à escolha de local de implantação como também no que concerne à concepção das obras de tomada d'água e lançamento dos efluentes. As vazões do circuito de refrigeração de usina nucleares, por exemplo, sendo da ordem de grandeza de 50 a 200 m³/s, para as maiores centrais, exige que estes estudos sejam cuidadosos (ANGRA I = 40 m³/s; ANGRA II = 80 m³/s).

Os principais estudos a efetuar são de cinco tipos:

- Adquirir um bom conhecimento das correntes costeiras, de modo a escolher possíveis locais para a implantação da usina com boa capacidade de refrigeração (efeito de dispersão).
- Adquirir um bom conhecimento da ondulação e da mobilidade do fundo para assegurar a estabilidade e o funcionamento das obras projetadas.
- Traçar as curvas isotérmicas para a determinação aproximada da posição da tomada d'água e, eventualmente, para determinar a distância de implantação de outra usina próxima, mas principalmente a fim de se estimar o impacto ecológico provocado pelo lançamento.
- Estudar a posição relativa entre a tomada d'água e o lançamento, a fim de evitar a recirculação (curto-circuito) e a conseqüente diminuição do rendimento térmico da usina e o aumento do impacto ecológico.
- Estudar os detalhes da tomada d'água e do lançamento, a fim de que estas obras sejam estáveis, econômicas e que não venham a afetar o equilíbrio sedimentar costeiro (transporte litoral).

É evidente que certos problemas terão melhor representação através de modelos matemáticos, enquanto outros serão melhor representados por modelos físicos. Todavia, em muitos casos, a observação dos dois modelos poderá levar a conclusões úteis sobre o caso específico estudado, bem como a conclusões mais genéricas que também serão úteis, sem dúvida alguma, nos estudos futuros.

Os modelos matemáticos são utilizados para a resolução de problemas ligados a dispersão térmica, radioativa, química e biológica, mas a sua principal aplicação está nos problemas envolvendo grandes áreas, caso em que os modelos físicos seriam de execução difícil ou até mesmo impossíveis. Os modelos físicos são, em geral, mais trabalhosos para serem construídos e aferidos, sendo assim eles são mais utilizados para o estudo de detalhes nas zonas próximas do lançamento onde os modelos matemáticos apresentam dificuldade de descrição das fronteiras geométricas.

Assim mesmo alguns modelos físicos de zonas afastadas (escalas pequenas) são construídos para estudos gerais e para comparação de resultados com os modelos matemáticos, podendo-se ter uma idéia melhor do funcionamento não só da obra como também dos modelos, para que em estudos futuros fique evidenciada a limitação de cada método empregado, bem como a sua relação de dependência e complementação. Devido aos efeitos de escala, principalmente sobre a turbulência, o modelo físico de pequena escala, abrangendo grande áreas, só é utilizado quando as correntes são fortes. No caso de correntes fracas em que aparecem fenômenos de estratificação, as escalas do modelo físico devem ser grandes e o modelo então só poderá ser de zona intermediária, isto é, modelos locais.

5 - EXEMPLO DE UM PROGRAMA PARA A ESCOLHA DA LOCALIZAÇÃO DE UMA USINA NUCLEAR

A seleção do local comportará, no total, cinco etapas sucessivas, desde a decisão da construção da usina até a assinatura do contrato de construção, a saber:

- 1.^a etapa: Pré-seleção de várias zonas possíveis.
- 2.^a etapa: Levantamento de dados nos locais das zonas pré-selecionadas.
- 3.^a etapa: Seleção de uma das zonas possíveis.
- 4.^a etapa: Estudos complementares do local escolhido para a elaboração do Anteprojeto.
- 5.^a etapa: Estudos complementares do local escolhido para a elaboração do Projeto.

Não se deve confundir as etapas, que são bem distintas, devendo-se organizar e seguir um cronograma bem elaborado e bem detalhado, supondo-se sempre uma coordenação eficiente entre as partes envolvidas

Passa-se a seguir a descrever resumidamente estas etapas:

- 1.^a etapa:

Pré-seleção de várias zonas possíveis (três a cinco)

Trata-se de selecionar várias zonas do litoral (com aproximadamente 30 km de extensão cada uma) baseado nos dados existentes e em inspeção locais.

Os levantamentos necessários são:

- . levantamentos aerofotogramétricos (topografia, mosaicos, urbanizações, acessos, etc...)
- . disponibilidade de água de refrigeração (correntes, temperaturas, ondas, marés, morfologia litoral, ventos, etc...)
- . disponibilidade de água doce e riscos de inundações (hidrologia de superfície e subterrânea)
- . características geológicas
- . dados sobre as populações locais (tendo em vista o transporte de poluentes pelo vento, etc...)
- . dados sócio-econômicos (atividades individuais, agrícolas, pesca, turismo, etc...)
- . dados meteorológicos (temperatura, vento, pluviosidade, umidade, etc...)
- . dados sobre os meios de transporte (vias férreas, estradas de rodagem, portos, etc...).

O resultado da síntese destes levantamentos e estudos deve constituir um relatório preliminar onde é analisada, entre outras coisas, o impacto sobre o ambiente que pode causar em cada zona a presença da usina nuclear.

Esta fase não comporta medições no terreno, mas apenas levantamentos de dados já existentes e inspeções locais por especialistas. A duração desta 1.^a etapa pode ser de cerca de 6 (seis) meses; o relatório deverá indicar os levantamentos que serão necessários na 2.^a etapa.

- 2.^a etapa:

Levantamento de dados nos locais das zonas selecionadas

Uma vez aprovada a escolha das várias zonas pré-selecionadas, deverão ser feitos os seguintes levantamentos e estudos:

- . descrição detalhada dos locais levando em consideração o que existe atualmente e os planos futuros (levantamentos geográficos, administrativos, econômicos, sociais, culturais, etc...)
- . medições meteorológicas locais (vento a 10 m do solo, umidade, pressão atmosférica, pluviometria, etc...)
- . medições oceanográficas (marés, ondas, batimetria, natureza do fundo do mar, turbidez de água, medições de temperatura para detecção de estratificação térmica, medições de correntes, etc...)
- . prospecções geológicas (inspeções locais, jazidas, sondagens, etc...)
- . levantamentos ecológicos (despejos líquidos, gasosos e sólidos, flora e fauna terrestres, flora e fauna marinhas, estudos dos impactos térmicos e radioativos no meio, etc...)
- . rede elétrica existente.

Esta etapa pode durar cerca de 6 meses e originará um novo relatório muito importante para a 3.^a etapa que é a mais delicada. Nesta etapa pode-se utilizar modelos de circulação de zona afastada para se ter noção do local de lançamento dos efluentes. Geralmente são empregados modelos matemáticos, eventualmente modelos físicos.

- 3.^a etapa

Seleção de uma das zonas possíveis

A análise comparativa dos dados recolhidos conduzirá a escolha de uma zona considerada melhor para a implantação da usina.

- 4.^a etapa

Estudos complementares do local escolhido para a elaboração de Anteprojeto

Uma vez escolhido o melhor local, os meios logísticos e de medição se concentrarão nele, para a obtenção de dados mais precisos. Assim far-se-ão:

- . Estudos oceanográficos (batimetria mais precisa, medições de temperaturas e de correntes).
Estuda-se um anteprojeto de tomada d'água e de lançamento do efluente
- . Estudos geotécnicos
- . Estudos de transporte de materiais pesados.

Esta etapa tem por objetivo fornecer os dados para a elaboração de um Anteprojeto. Pode-se usar modelos de circulação de zona intermediária. Estes modelos podem ser físicos e/ou matemáticos.

- 5.^a etapa

Estudos complementares do local escolhido para a elaboração do Projeto

O objetivo desta etapa é o de fornecer dados para o projeto definitivo da Usina e de preparar um relatório preliminar de análise de segurança, contendo este último:

- proteção contra agressões naturais ou não (inundações, atentados, tempestades, etc...)
- proteção contra acidentes (queda de aeronaves, explosões, etc...) e
- avaliação do impacto da usina sobre o meio ambiente (contaminação radioativa das populações devido a acidentes ou devido ao funcionamento normal, consequências dos efluentes térmicos e químicos, etc...).

Neste estágio dos estudos, além das medições locais, são efetuados estudos mais detalhados como, por exemplo, modelos matemáticos de dispersão dos efluentes e modelos físicos para os estudos das obras hidráulicas (tomadas d'água, etc...) e obras civis de um modo geral. Os modelos físicos das obras hidráulicas poderão servir também para os estudos de dispersão dos efluentes térmicos.

Estes estudos servirão para o detalhamento das obras da Usina na fase do projeto definitivo, evitando assim as modificações "a posteriori" extremamente onerosas e desagradáveis.

CONCLUSÕES

Deve-se notar que a formação de uma equipe que tenha capacidade para enfrentar estes problemas técnicos de natureza complexa, exige uma série de cuidados e só pode ser feita de maneira lenta e gradual, através de etapas de trabalho perfeitamente definidas e cuidadosamente preparadas. Para o estudo do lançamento de efluentes é necessário o domínio das técnicas de modelos matemáticos e físicos de Hidrodinâmica da Poluição.

Chama-se finalmente a atenção para o fato de que o aspecto hidráulico-ambiental é apenas um dos aspectos que se deve considerar na escolha de um local para uma instala-

ção industrial. Esta escolha deve levar em consideração os aspectos oceanográficos, ecológicos, geológicos, o transporte de eletricidade e as diversas restrições que cada aspecto pode apresentar.

- BIBLIOGRAFIA

- 1 - ALBERTSON et alii. Diffusion of submerged Jets. ASCE Transactions, V. 115, 1950.
- 2 - BENNET e MYERS. Fenômenos de transporte. São Paulo, Mc Graw Hill do Brasil, 1978.
- 3 - CNEXO - COB - S.A.U.M. de l'Estuaire de la Seine. Projet de Programme. Paris, 1978.
- 4 - INSTITUT DE MÉCANIQUE DE GRENOBLE. La plaque tournante. Grenoble, 1975.
- 5 - LABORATOIRE NACIONAL D'HYDRAULIQUE. Les études de réfrigération des centrales thermiques en bord de mer. Chatou, 1975.
- 6 - ———. Le Laboratoire Nacional d'Hydraulique. Chatou, 1973.
- 7 - ———. Mécanique des fluides et environnement; utilisation des modèles expérimentaux. Chatou, 1976.
- 8 - ———. Modélisation de certains écoulements en eau et en atmosphère. Chatou, 1976.
- 9 - ———. Structure et modelisation des jets. Chatou, 1976.
- 10 - ———. Utilisation des modèles mathématiques pour l'étude de la réfrigération des centrales électriques installées en bord de la mer. Chatou, 1976.
- 11 - LÉSIEUR, A. Turbulence homogène et isotrope. Grenoble, IMG, 1978.
- 12 - RIOS, Jorge L.P. Importância do efluente na escolha do local de implantação de usina nuclear. Rio de Janeiro, 1982. (Trabalho apresentado no Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, 18, Panamá, agosto 1982).
- 13 - ———. Modelos matemáticos de auto-depuração dos cursos d'água. Lisboa, LNEC, 1974.
- 14 - ———. Utilização de modelos físicos e matemáticos no lançamento de efluentes. Rio de Janeiro, 1981. (Trabalho apresentado no Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, 11, Fortaleza, setembro, 1981.