

Metodologias Avançadas para o Estudo de Impactos Ambientais de Termelétricas

A. Caldeira-Pires, UnB, A. C. P. Brasil Jr., UnB, C. G. Veras, UnB,
J. A. Mota, IPEA, J. V. Gallo, ELN

Resumo – Este projeto teve como objetivo geral o desenvolvimento de estudos avançados para a avaliação e o gerenciamento de impactos ambientais em Unidades Geradoras Termelétricas, operando em diferentes ciclos termodinâmicos, com diferentes tipos de combustíveis (gás Natural, óleo combustível, biomassa, etc.). Os seus resultados específicos são: i) análise da eco-eficiência das unidades geradoras, avaliando os diferentes cenários para a escolha da UGT a partir de parâmetros de impacto ambiental em adição aos tradicionais parâmetros econômicos; ii) caracterização das emissões gasosas em termelétricas, relacionando a quantidade e qualidade (CO_2 , CO , NO_x e SO_x) com o tipo de combustível; iii) caracterização da dispersão destes poluentes no ar, iv) identificação, através de simulação numérica, o efeito da pluma térmica gerada numa UGT, em corpos d'água (estuários, rios e lagos).

Palavras-chave—Avaliação do Ciclo de Vida; Dispersão de Poluentes; Impactos Ambientais; Pluma Térmica; Termelétrica.

I. INTRODUÇÃO

A Geração de Energia Elétrica no Brasil caracteriza-se por um modelo baseado na geração hidrelétrica. A evolução histórica do perfil da matriz energética brasileira, reflete uma tendência natural de implantação de unidades geradoras, visto às características do território nacional, propícias à utilização dos recursos hídricos.

Nota-se porém que, para uma matriz energética dependente na geração hídrica, o fluxo de investimentos para implantação de unidades geradoras devem se anteceder ao aumento de demanda, em defasagem de praticamente uma década. A escala de tempo para implantação de hidrelétricas, requer um planejamento energético forte e uma disponibilização contínua de recursos para investimento, cujos benefícios serão auferidos alguns anos mais tarde.

A opção brasileira recente, visando a implantação de termelétricas, utilizando o gás natural, foi uma solução estratégica vislumbrada em face da carência de investimentos do

estado no setor de energia na última década.

A implantação de projetos de termelétricas requer um tempo bem menor (2-4 anos) o que poderia compensar o período de letargia de investimento dos últimos governos. A utilização de gás natural de reservas nacionais na Amazônia e na costa brasileira, assim como a viabilização da utilização do gás natural boliviano, compõe um quadro positivo para o planejamento nacional de implantação de termelétricas.

A tendência atual de instalações de Unidades Geradoras Termelétricas (UTE) apresenta alguns inconvenientes no que concernem os impactos ambientais. O funcionamento de UTE's envolve a queima de combustíveis fósseis (gás natural, carvão, óleo, etc.) ou biomassa (bagaço de cana, resíduos industriais, etc.) que caracteriza um custo ambiental importante associado às emissões gasosas que contribuirão para o aumento de poluição do ar em uma dada região (escala local).

Por outro lado, estas emissões contribuirão para o aumento do efeito estufa (escala planetária). A poluição térmica de algumas UTE's podem também impactar de maneira significativa corpos d'água que são utilizados como depositários para a água aquecida proveniente do condensador.

A avaliação de tais impactos, que compõem parte do Estudo de Impactos Ambientais (EIA), na atualidade, envolvem a utilização de uma série de metodologias avançadas associadas à simulação numérica e à modelagem de problemas termo-hidrodinâmicos e de avaliação integrada de eficiência termo-econômica e ambiental. O desenvolvimento de um saber-fazer nacional, operacionalizando e adaptando tais metodologias, vem ao encontro da agilização de execução e análise de EIA-RIMA's.

Nas últimas décadas do século XX, as relações entre a sociedade humana e o ambiente tornaram-se num assunto relevante em nosso diálogo social. Esta preocupação social está conduzindo as nações ao uso do princípio precautório visando proteger o ambiente. Onde há ameaças de dano sério ou irreversível, a prevenção da degradação ambiental deverá ser efetuada através do adiamento de medidas com baixo valor da relação custo-benefício mas de alta imprecisão científica.

No debate atual em política ambiental e desenvolvimento econômico podem ser diferenciadas duas posições básicas que pode ser caracterizado como segue:

1. É argumentado que uma política ambiental exigente pode ser combinada de forma prospera com o desenvolvimento econômico e com as políticas de emprego.
2. É reivindicado que o aprofundamento das políticas ambientais podem colocar em risco a economia.

Este trabalho foi apoiado pela Eletronorte, pela Fundação da Universidade de Brasília e pela FINATEC.

A. Caldeira-Pires trabalha no departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (email: armandcp@unb.br),

A. C. P. Brasil Jr. trabalha no departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (email: brasiljr@unb.br),

C. G. Veras trabalha no departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Brasília (email: gurgel@unb.br)

J. A. Mota, trabalha no IPEA (email: jamota@ipea.org.br),

J. V. Gallo trabalha na Eletronorte (email: gallo@eln.gov.br).

Coenen e Klein-Vielhauer(1997) demonstram que existe evidência empírica em defesa da primeira posição. Historicamente, a indústria representou um papel secundário no estabelecimento de metas ambientais mais abrangentes. Os gerentes das firmas industriais mantiveram uma visão de curto prazo na qual tradicionalmente os impactos ambientais ocasionados após o processo produtivo não eram problemas do fabricante.

Porém, nas últimas quatro décadas tem sido observado uma mudança nas em práticas empresariais com a incorporação de metas ambientais. Esta mudança evolui em quatro fases de administração ambiental, como descrito por Ehrenfeld e Howard (1996):

- Gestão Ambiental como Solução de Problemas;
- Gestão Ambiental como Adequação à Legislação;
- Gestão Ambiental Pró-ativa; e
- Administrando para o Ambiente.

É nesta quarta e última fase que as preocupações ambientais se tornam um fator estratégico nos processos de decisão empresarial. Neste contexto, a administração ambiental é então considerada como uma questão determinante para desenvolvimento sustentável, evoluindo das práticas práticas para um nova postura em termos de desempenho ambiental industrial - Eco-eficiência. Neste nível da qualidade da gestão ambiental o uso do conceito do ciclo de vida do processo produtivo torna-se um instrumento importante, caracterizando o surgimento dos procedimentos intitulados Ecologia Industrial e Projeto para o Ambiente (*Design for Environment*) (Anjo e Huber, 1996).

A avaliação em conjunto do ciclo produtivo tem demonstrado ser é uma técnica que pode ser usada para avaliar de forma completa e precisa o desempenho ambiental de um produto, processo ou atividade (os primeiros estudos surgiram, por exemplo, com Boustead, 1972,; Sundstrom, 1973, e mais recentemente por Assies, 1991, Consoli, 1993, e Curran, 1996), tendo sua importância aumentado nos últimos vinte anos.

Este conjunto de novos conceitos empresariais estão se tornando em importantes ferramentas para a tomada de decisões empresariais, permitindo uma avaliação dos impactos ambientais associados às diversas etapas de um ciclo produtivo, como os lançamentos de substâncias químicas poluentes ou como os desequilíbrios ambientais oriundos das relações industriais com o meio circundante.

Estas novas ferramentas podem ser utilizadas adequadamente como parte de gestão ambiental, associada à gestão empresarial, permitindo alcançar o objetivo comum de um desenvolvimento econômica e ambientalmente sustentável (Berkhout, 1996).

II. METODOLOGIA

O Projeto foi dividido em três etapas paralelas que analisaram em separado cada uma das três características identificadas como relevantes para a descrição precisa do impacto ambiental oriundo de termelétricas:

ETAPA 1: Análise da Eco-eficiência

1.1 - Metodologia para a avaliação de cenários na escolha

da UTE:

1.2 - Influência do combustível na eco-eficiência da UTE:

ETAPA 2: Avaliação das Emissões Gasosas em Termelétricas

2.1 - Análise comparativa das emissões oriundas da queima de gás natural, óleo e biomassa:

2.2 - Dispersão dos poluentes no ar:

ETAPA 3 - Análise da Poluição Térmica - Simulação da pluma térmica

III. PRINCIPAIS RESULTADOS

Este projeto de pesquisa foi realizado no âmbito de uma parceria entre uma empresa pública e uma universidade federal. Este perfil caracterizou a forma como o projeto foi efetuado, principalmente no sentido que os resultados foram obtidos com a utilização de mão-de-obra estudantil, de diversos níveis de graduação.

Dessa forma, nesta seção são apresentados os principais resultados gerados neste estudo, que por sua vez indicam o documento científico acadêmico no qual o objetivo, metodologia e resultados específicos estão detalhadamente descritos.

Nesse contexto, a transferência de conhecimento para a sociedade foi efetuada em sua forma plena, especificamente:

- Formação de Engenheiros e Mestres especializados nas áreas afins ao projeto, e por conseguinte, ao parceiro empresarial;
- Disseminação do conhecimento para a sociedade através dos mecanismos de transferência de conhecimento científico, revistas especializadas e congressos científicos.

Por fim cabe ressaltar que os estudos aqui efetuados não encontram similar no território Nacional, e que as ferramentas científicas adquiridas no âmbito deste projeto colocam a UnB e a Eletronorte na fronteira da pesquisa científica nesta área do conhecimento.

A. Etapa 1 - Análise da Eco-eficiência

Sobre o aspecto de aplicação em projeto demonstrativo, a linha mestra para abordagem metodológica consiste em aplicar os conhecimentos desenvolvidos para a avaliação da possibilidade de modernização ambiental de uma UTE piloto, definida no decorrer do projeto pelas partes envolvidas. Esta Unidade foi utilizada como *Benchmark* para as diferentes metodologias desenvolvidas no âmbito deste projeto. As simulações computacionais e modelos termo-mecânicos foram testados com base em informações reais sobre esta UTE piloto e sobre a população que utiliza os serviços por ela prestados.

Os resultados oriundos desta análise foram baseados em modelos computacionais específicos para avaliação do impacto ambiental dos processos analisados, especificamente foram utilizadas a metodologia de valoração contingente e a metodologia da avaliação do ciclo de vida dos produtos e

processos.

1) Metodologia para a avaliação de cenários na escolha da UTE

A minimização da crise energética brasileira depende do volume de investimentos destinados para a construção de hidroelétricas, termoeletricas e de outras fontes de geração de energia. Esses aportes são necessários, mas é importante também investir em programas que possibilitem a conservação de energia e conscientizem a sociedade quanto ao uso racional dos recursos naturais, sejam renováveis ou não-renováveis.

Devido à abundância de recursos hídricos, o Brasil concentrou o seu modelo energético em um sistema de geração hidráulica, o qual responde por 91% da geração total. Isso tem acarretado sérios danos ao meio ambiente. Para Vianna (2001) “as grandes usinas causam impactos ambientais, sociais e culturais, pois, além de alterar o ciclo hidrológico ainda interfere no equilíbrio da flora e da fauna locais, que hoje são aparentemente remediáveis, e em geral provocam um grande deslocamento de populações”.

Por outro lado, a geração de energia por meio de termoeletricas é uma alternativa à geração hidráulica, pois do ponto de vista econômico apresenta *payback* acelerado, quando comparado com projetos de geração hidráulica, e baixo tempo de implantação (de 2 a 4 anos). Ocorre que, por exemplo, a geração por meio de termoeletricas a gás é 25%, em média, mais cara do que a geração de energia a partir de hidroelétricas (Vianna, 2001).

Por seu turno, o Poder Público, ao definir as suas prioridades de investimentos, não considera em suas análises indicadores que reflitam a aceitabilidade do projeto pelas populações locais, tampouco analisa, *a posteriori*, os diversos impactos causados à população contígua ao projeto.

Neste contexto, inserem-se questões de eco-eficiência energética, cujo viés, neste projeto, permitirá avaliar o comportamento dos consumidores de energia em relação aos riscos de projetos de tal magnitude. Então, pela ótica do consumidor, como as suas escolhas são feitas? Que variáveis sociais, ambientais e econômicas estão inseridas em suas preferências?

Deste modo, este projeto propõe avaliar alternativas de escolha dos consumidores de energia, de modo a captar suas preferências em relação à geração de energia a partir das diversas proposições termoeletricas, comparando-as à geração a partir do sistema hidráulico.

Esta etapa do projeto teve como objetivo principal realizar uma avaliação da disposição a pagar para alteração do modelo de produção de energia elétrica entre consumidores de energia elétrica da cidade de Macapá, no estado do Amapá, Brasil. Um mapa de preferências dos consumidores foi elaborado a partir de um *survey* especialmente desenhado, com a finalidade de se eliciar os usuários de energia elétrica a declararem suas opções em relação ao consumo de energia gerada a partir de termoeletricas. O *survey* foi experimentado em uma pesquisa de campo, em que foram entrevistados 100 (cem) residências, escolhidas ao acaso, por toda a região metropolitana da cidade de Macapá.

As inferências por meio da matriz de correlação demonstram que os pesquisados que têm os melhores níveis de escolaridade também apresentam os melhores rendimentos. O deslocamento de um entrevistado para um nível de escolaridade acima ocasiona, em média, uma chance de aumentar o seu ganho salarial mais do que proporcional. Por outro lado, os valores atribuídos à disposição a pagar declarado pela amostra demonstram que os residentes com maiores rendas mensais, em condições *ceteris paribus*, atribuem maiores valores de disposição a pagar.

Outro resultado surpreendente pode ser verificado, em condições *ceteris paribus*, para o fator horas sem energia (dec), o qual demonstra que os usuários estão dispostos a pagar maiores quantias em suas contas de energia para uma diminuição no número de horas sem energia.

Os resultados do modelo sugerem que as estatísticas estimadas são consistentes. Isto significa que os testes ‘F’ e ‘t’ são significantes ao nível de no máximo 4,5%. Isso permitiu a estimação de R\$ 2,98 de disposição a pagar média por mês nas contas de energia dos residentes para que haja uma mudança no sistema de geração de energia termoeletrica para um sistema hidráulico.

2) Influência do combustível na eco-eficiência da UTE

Esta etapa do projeto relacionou-se à aplicação da metodologia de Avaliação de Ciclo de Vida (ACV) à primeira etapa da construção da Unidade Termoeletrica de Santana/AM (referente apenas às Turbinas LM2500). Para a sua análise foram quantificados e avaliados os fluxos mássicos e energéticos dos materiais de entrada, analisados a partir da ferramenta computacional Simapro, especificamente adquirida para este fim.

Uma das finalidades deste estudo foi a de caracterizar os métodos de produção de energia da matriz energética segundo a análise de impacto ambiental, avaliando a unidade geradora e as etapas intermediárias do processo produtivo. A metodologia utilizada foi a Avaliação de Ciclo de Vida (ACV), fundamentada nas normas ISO 14040, que definem o ciclo de vida de um produto como sendo as consecutivas etapas da utilização de um produto, desde a extração das matérias-primas, transformação de recursos naturais até a final deposição do produto na Natureza, **Figura 1**.

Inicialmente na avaliação do ciclo de vida foi identificado claramente os limites de atuação do seu sistema de forma a concentrar o estudo em parâmetros considerados relevantes para os objetivos em estudo. Esta fase refere-se especificamente à escolha dos processos de produção e da compilação dos fluxos de entrada (input) e de saída (output) dos limites do sistema. No interior da fronteira do sistema foram consideradas para análise duas fases do ciclo de vida da unidade, a de construção e a de operação, para um período total de operação de 30 anos, conforme apresentado pela **Figura 2**. A fase de desinstalação, apesar de ser uma etapa importante na análise total do ciclo de vida, neste estudo foi desconsiderada uma vez que segundo a Eletronorte não há estimativa para que a Termoeletrica seja desativada. Já na etapa de construção considerou-se como fatores importantes para a análise, a matéria-prima utilizada, o processo de produção e o

seu transporte até a unidade geradora.

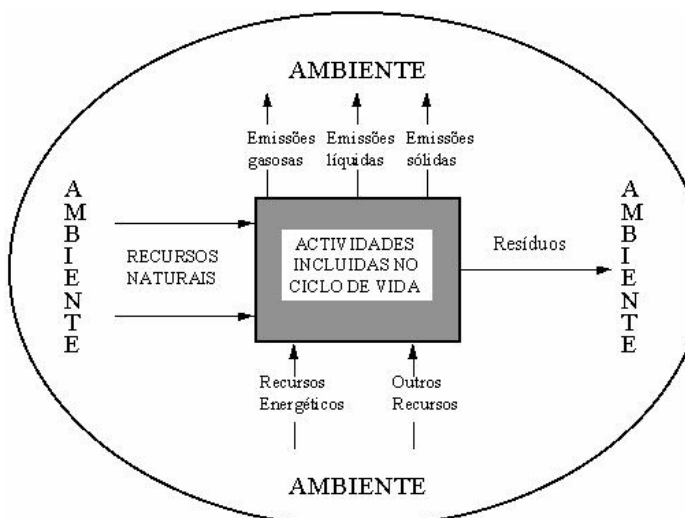


Figura 1 Fluxos Mássicos e Energéticos através de um Ciclo de Vida de Produto ou Processo

A quantificação do Inventário, **Figura 3**, dos fluxos mássicos dos diversos materiais e determinado o processo de produção no software Simapro 5.1, foi utilizado o banco de dados deste programa computacional para obtenção das emissões caracterizadas em cada parte do processo produtivo. A árvore de processos gerada para as etapas analisadas do ciclo de vida de uma termelétrica é apresentada na **Erro! Fonte de referência não encontrada.**

Estas informações são agrupadas pela programa de forma a caracterizar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida da termelétrica, e apresentado pela **Figura 4**.

B. Etapa 2 - Avaliação das Emissões Gasosas em Termelétricas

1) Análise comparativa das emissões oriundas da queima de gás natural, óleo e biomassa

Os resultados da análise da cinética química serão utilizados em modelos computacionais de dinâmica de fluidos para o diagnóstico dos processos de fluidotermodinâmica característicos das diversas opções tecnológicas estudadas, permitindo caracterizar a dispersão destes poluentes no ar para uma determinada área geográfica a ser definida.

O estudo numérico de câmaras de combustão apresenta grandes limitações quando o objetivo é a previsão de produtos com baixa concentração mássica, como por exemplo, NO_x, CO, SO₂ entre outros. Na maioria dos casos, a geometria do combustor apresenta certo grau de complexidade, como por exemplo em turbinas a gás, e em outros casos, como nos motores de combustão interna dada a natureza fortemente transiente e com forte interação com as paredes do escoamento. No caso de turbinas a gás, os dispositivos responsáveis pela ancoragem da chama fazem com que o escoamento apresenta fortes curvaturas. Tais características comprometem a confiabilidade dos métodos numéricos, particularmente dos modelos de turbulência. Assim, o esforço computacional observado em códigos numéricos 3D, na solução do campo de velocidade, impossibilita a utilização

de mecanismos de reação com cinética química detalhada. Para cada espécie química considerada uma equação de conservação deve ser integrada. No caso da queima de gás natural, admitindo o combustível composto predominantemente por metano, o mecanismo GRImech 3.2 emprega mais de 50 espécies químicas.

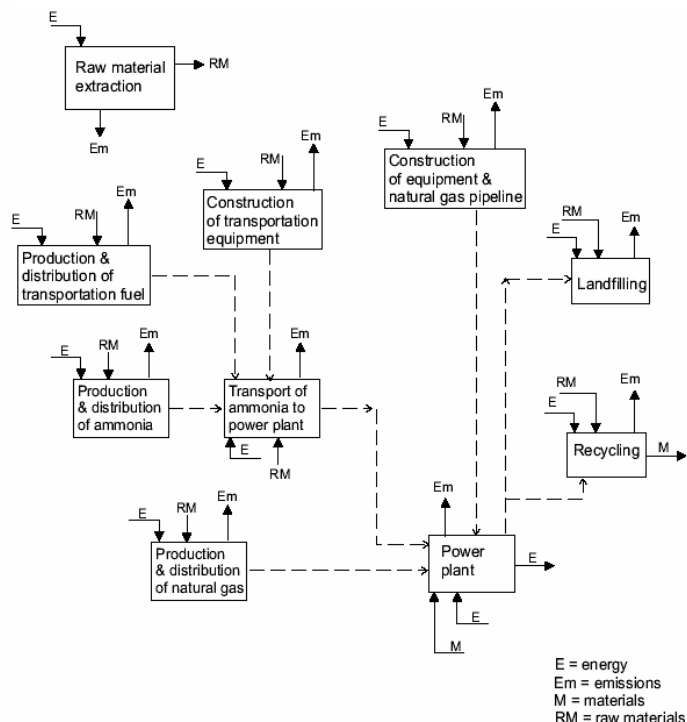


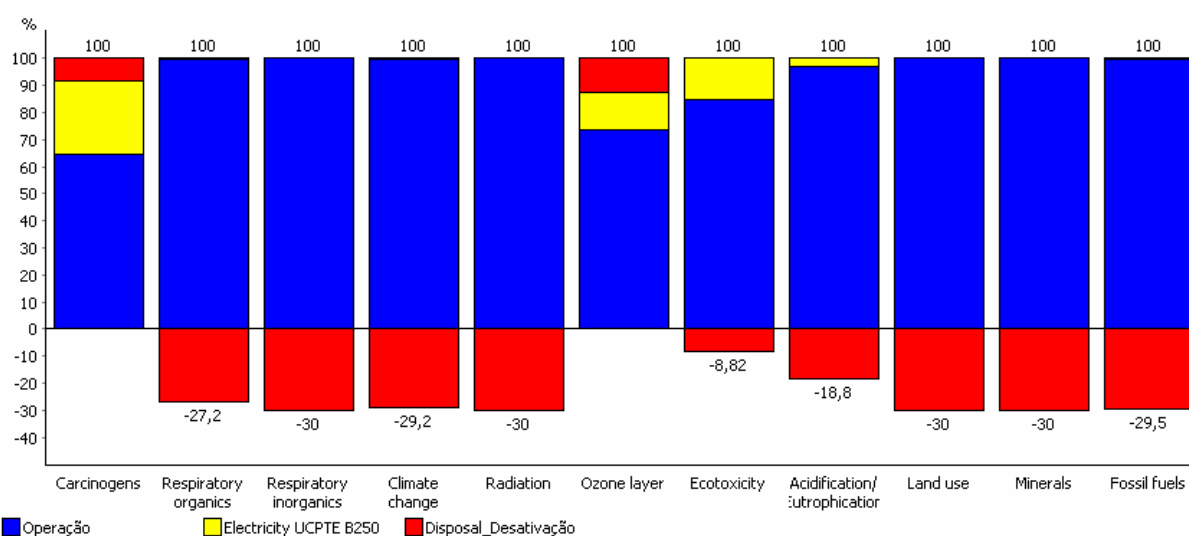
Figura 2 Fronteiras do Sistema a ser analisado para o Ciclo de Vida de uma Termelétrica

A taxa de reação de uma dada espécie é composta por um certo número de reações concorrentes que são descritas na forma de Arrhenius. Na equação de Arrhenius a influência da energia de ativação surge na forma de uma exponencial da temperatura. O cálculo e uma exponencial, num computador digital, é grande consumidor de tempo. A taxa de reação, numa equação de conservação, aparece no termo de fonte e dada as grandes diferenças nas escalas de tempo, faz com que o sistema matemático fique com alto grau de rigidez. Predições numéricas de emissões com bom grau de confiabilidade, portanto, devem ser obtidas com a combinação de técnicas numéricas onde o escoamento é resolvido com detalhes num código CFD (“computational fluid dynamics”) com modelo de combustão simplificado (CFX 5.6) e posteriormente resolvido num código com aerodinâmica do escoamento simplificada, mas com mecanismos reativos detalhados (CHEMKIN).

A previsão, através de códigos computacionais, dos níveis de emissão em motores diesel é mais comumente realizada com o código KIVA, desenvolvido pelo “Los Alamos Laboratory”. O código KIVA utiliza algumas rotinas do código CHEMKIN no cálculo das taxas de reação do hidrocarboneto em oxidação.

Process	DQI	Unit	Total	Operação	Electricity UCPT E B250	Disposal_Desativação
Total of all processes		Pt	2,46E7	3,51E7	2,29E4	-1,05E7
Remaining processes		Pt	1,41E4	1,95E4	166	-5,64E3
turbina	■	Pt	2,15E7	3,08E7	x	-9,23E6
Raw natural gas NL U	■	Pt	2,91E6	4,15E6	x	-1,25E6
Output gas turbine production sweet gas U	■	Pt	3,88E4	5,55E4	x	-1,66E4
Aluminium 25% rec. B250	■	Pt	1,98E4	2,83E4	x	-8,48E3
Electricity from coal B250	■	Pt	1,94E4	0,00969	9,69E3	9,69E3
Heat diesel B250	■	Pt	1,32E4	9,8	x	1,32E4
Electricity from oil B250	■	Pt	1,31E4	0,00653	6,53E3	6,53E3
Output flare production sweet gas U	■	Pt	1,17E4	1,68E4	x	-5,03E3
Output gas turbine pipeline NL U	■	Pt	1,07E4	1,53E4	x	-4,58E3
Crude coal B	■	Pt	9,09E3	1,3E4	x	-3,9E3
Electricity from lignite B250	■	Pt	7,77E3	0,00389	3,89E3	3,89E3
Electricity from gas B250	■	Pt	5,28E3	0,00264	2,64E3	2,64E3
Coal from underground mine UCPT E U	■	Pt	4,68E3	6,68E3	x	-2E3
Crude coal bj	■	Pt	4,04E3	5,77E3	x	-1,73E3
Diesel in diesel generator onshore U	■	Pt	3,01E3	4,3E3	x	-1,29E3
Crude oil production onshore U	■	Pt	2,7E3	3,85E3	x	-1,16E3
Leakage production natural gas NL U	■	Pt	2,31E3	3,3E3	x	-990
Crude oil production offshore U	■	Pt	2,17E3	3,1E3	x	-929
Natural gas B	■	Pt	1,85E3	2,64E3	x	-792
Drilling waste to land farming U	■	Pt	1,67E3	2,38E3	x	-715
Coal tailings in landfill U	■	Pt	1,19E3	1,7E3	x	-509
Sinter ETH U	■	Pt	1,15E3	1,65E3	x	-495
Leakage raw natural gas NL U	■	Pt	1,04E3	1,48E3	x	-445

Figura 3 Inventário parcial do Ciclo de Vida de uma Termelétrica



Analyzing 1 p life cycle 'Life Cycle_Termelétrica'; Method: Eco-indicator 99 (E) / Europe EI 99 E/E / characterization

Figura 4 Caracterização dos Impactos Ambientais de uma Termelétrica

Previsões numéricas podem, contudo, ser realizados unicamente no código CHEMKIN através de rotina específica para motores de combustão interna. A modelagem do escoamento é feita com grandes simplificações. No estudo de emissões com origem em motores com ignição por compressão destaca-se o mecanismo detalhado para o heptano que é constituído de 2540 reações elementares e 556 espécies químicas.

2) Dispersão dos poluentes no ar

Um dos principais componentes do estudo de impactos ambientais associados à operação de Usinas Termelétricas

(UTE) é a análise da emissão e da dispersão de poluentes na atmosfera. A liberação de componentes gasosos resultantes da queima de combustíveis em câmaras de combustão de UTE's e sua posterior diluição no ar atmosférico, devem ser quantificadas de maneira a verificar a conformidade de operação de um dado empreendimento, dentro de limites desejáveis de concentração dos diferentes poluentes, os quais devem ser compatíveis com a saúde humana e com a qualidade ambiental de ecossistemas.

O uso de modelos numéricos para o estudo da dispersão atmosférica de gases é uma ferramenta poderosa para o suporte à decisão em estudos ambientais. O uso de tais ferra-

mentas permite o estabelecimento de análises considerando vários cenários para condições atmosféricas locais e de potenciais das fontes de emissão.

O objetivo principal desta parte do trabalho é de apresentar uma metodologia convencional de cálculo de concentrações de poluentes na proximidade de uma usina termelétrica, discutindo sua formulação matemática e as diferentes variáveis que devem ser consideradas em um estudo de impactos ambientais.

Por fim um estudo de caso é apresentado, onde os modelos discutidos são aplicados em uma situação real. Nota-se que o presente trabalho apresenta também uma discussão e uma proposta de avaliação de custos ambientais relativos às emissões gasosas. Tal modelo, proposta ainda de forma preliminar, visa apresentar um mapeamento de custos ambientais, associadas a estimativas internacionais de valor econômico do peso de poluentes, estimados com base no impacto de concentrações sobre a saúde humana e de ecossistemas.

Neste trabalho foram descritos os principais ciclos termodinâmicos utilizados na geração de energia elétrica. Os ciclos predominantes nas UTE's são: o ciclo simples ou aberto, e o ciclo combinado ou fechado. De acordo com estudos já realizados, o ciclo combinado é a melhor opção ambiental para usinas termoelétricas, considerando que possibilita emitir quantidade mais baixa de poluentes por MWh gerado.

Os impactos ambientais são analisados desde a implantação até a fase de geração das usinas. Estas devem se enquadrar a toda a legislação vigente selecionando as exigências legais aplicáveis, com relação à proteção e conservação dos recursos ambientais. Assim como o processo de Licenciamento Ambiental e de Licença de Operação.

Os impactos ambientais foram divididos em sete principais grupos: Impactos, Sonoros, Hídricos, Solo, Meio Biótico, Resíduos Sólidos, Meio Antrópico e da Qualidade do Ar.

Com o objetivo de minimizar estes impactos ambientais decorrentes da instalação e operação das UTE's, a escolha de um combustível que cause menos danos ao meio ambiente vem sendo uma solução encontrada para atender aos padrões exigidos pelos órgãos ambientais nacionais.

Para um monitoramento de emissões de poluentes oriundos da combustão são instalados nas saídas dos gases, ou seja, nas chaminés, sensores que medirão a quantidade de CO, NO_x, SO_x e particulados, os mais importantes poluentes gasosos, pois estes causam enormes danos ao meio ambiente. Esses dados juntamente com dados meteorológicos locais servirão de base para uma modelagem da dispersão desses poluentes mais próximos da realidade através de programas computacionais tais como ISC AERMOD VIEW.

Além das vantagens econômicas, é sabido das vantagens ambientais que o gás natural traz em relação a outros combustíveis fósseis, pois ele tem uma baixa presença de contaminantes gerando uma combustão mais limpa.

O óleo diesel marítimo, como combustível principal ou em caso de emergência, apresenta uma emissão de gases com maiores teores de enxofre e produção de resíduos sólidos no processo de geração. Além disso, possui baixo rendimento.

O carvão apresenta alto teor de cinzas e enxofre, acarretando numa poluição mais intensa.

Já a biomassa não é utilizada para a produção de energia em grande porte.

No estudo de caso foram descritas as visitas as UTE's de Bongi / Pau Ferro e Camaçari, relacionando os dados tecnológicos e características particulares das mesmas.

No caso da UTE Bongi / Pau Ferro foi abordada a questão de mudança da usina do bairro de Bongi, localizado na área metropolitana de Recife-PE, para o município de Pau Ferro, mais afastado do centro populacional e a mudança do principal combustível utilizado na usina, o gás natural em substituição ao óleo diesel, além da modernização dos equipamentos.

A UTE Camaçari, a exemplo de Bongi, está substituindo seu combustível principal para o gás natural, assim como a modernização dos equipamentos.

Realizada a modelagem computacional da simulação de dispersão de poluentes, utilizando o ISC – AERMOD VIEW, criado pela empresa Lakes-Environmental, foram associados os custos ambientais de cada um dos principais poluentes (CO, SO_x, NO_x e MP) analisados no modelo de simulação em suas respectivas áreas pré-determinadas.

C. Etapa 3 - Análise da Poluição Térmica

1) Simulação da pluma térmica

O objetivo principal desta etapa do trabalho é discutir a poluição térmica a partir de usinas termelétricas, discutindo as particularidades do problema hidrodinâmico de transferência de calor associado à dispersão da pluma térmica em meio aquático. Tal discussão contribui para a formação de uma base metodológica para o tratamento de tal tipo de problema ambiental.

A Poluição térmica é um efeito de estresse em ecossistemas aquáticos associado ao aumento de temperatura da água devido o rejeito térmico de um processo industrial. Este aumento de temperatura pode ser responsável por uma modificação na dinâmica da população de certos organismos aquáticos, modificando o equilíbrio da cadeia alimentar. Em sistemas de geração de energia através de termelétricas, o rejeito de calor do ciclo termodinâmico é efetuado pelo condensador. O calor rejeitado é despejado ao ar (em sistemas com torres de resfriamento) ou em água. Dependendo do arranjo da implementação real de um ciclo de produção de potência, a poluição térmica em corpos d'água se faz presente.

A avaliação da poluição térmica em um dado corpo d'água é efetuada durante os estudos de impactos ambientais, por meio da simulação numérica, ou em raras ocasiões, através de modelos reduzidos do escoamento no corpo d'água. Com a evolução atual de modelos de descrição do escoamento e da mistura turbulenta em escoamentos de superfície livre, cada vez mais simulações numéricas apresentam resultados realísticos e confiáveis. Em primeira aproximação, mesmo códigos computacionais simples que descrevem parametricamente a dispersão através da dispersão do jato 3D podem ser utilizados. Este tipo de metodologia permite uma análise confiável da região de mistura próxima à fonte

de emissão, tendo como dados de entrada uma descrição da hidrodinâmica do corpo d'água. Uma segunda metodologia envolve a resolução das equações de conservação (massa, quantidade de movimento e energia), completas, para o escoamento turbulento no corpo hídrico.

Nesse contexto, a **Figura 5** apresenta a visualização do campo de velocidade calculados, no plano de simetria e na proximidade da placa inferior. As estruturas principais do *entrainment* e das regiões de recirculação foram bem descritas por esta simulação. Observa-se nesta simulação a forma da região de reversão do escoamento próxima à saída do jato, característica de uma captura de fluido frio logo no início da injeção. A trajetória do jato é bem representada, sendo compatível com resultados anteriormente apresentados (e.g. Brasil Jr. et al. (1991)). Observa-se que neste caso específico o jato praticamente se alinha com a corrente principal a partir de $x/D=6$, portanto, neste caso específico, teremos um campo próximo relativamente restrito à proximidade da saída do jato. Na **Figura 6** apresentam-se visualizações das linhas de corrente que se iniciam na superfície injeção.

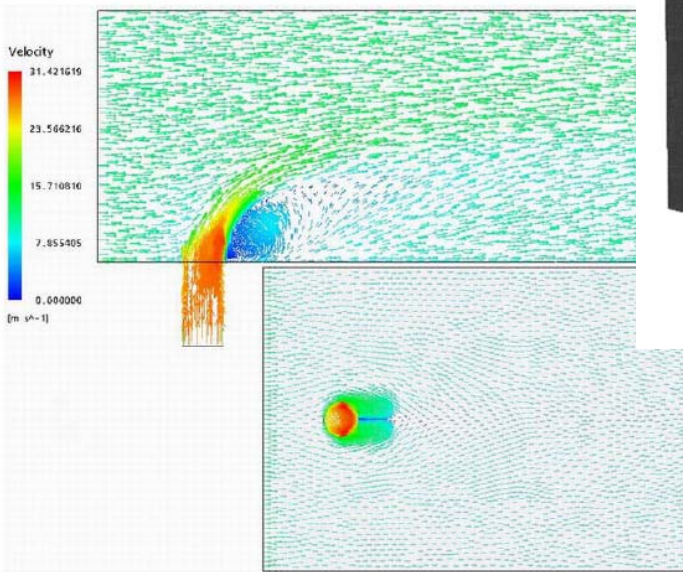


Figura 5 Visualização do campo de velocidade

No sentido de evidenciar a qualidade dos resultados, uma comparação de perfis de velocidade em várias posições é apresentada, utilizando também outros modelos de turbulência. Observa-se uma razoável aderência entre os resultados numéricos e experimentais, compatível também com outra intercomparação de resultados apresentadas na literatura.

Estas simulações demonstram a capacidade de representação do campo médio tanto qualitativamente (em suas estruturas topológicas) quanto quantitativamente, a partir da comparação entre os resultados obtidos com os experimentos de Crabb et al. (1989). Observa-se com base nos trabalhos em anexo que os resultados dos componentes do tensor de Reynolds não apresentam a mesma aderência de resultados, porém não compromete uma descrição do fenômeno de diluição de um escalar passivo, como pode ser observado na

Figura 7.

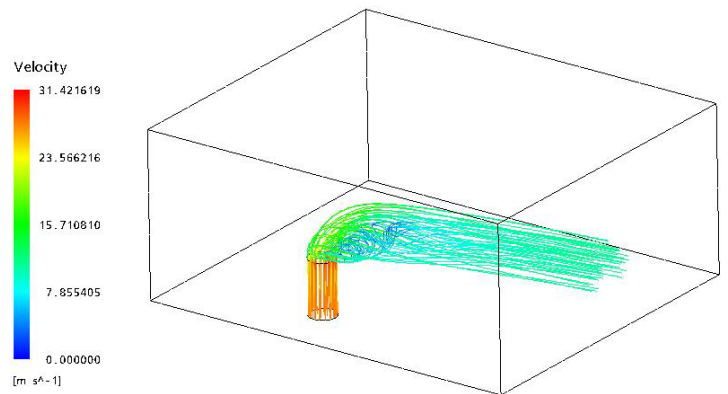


Figura 6 Linhas de corrente

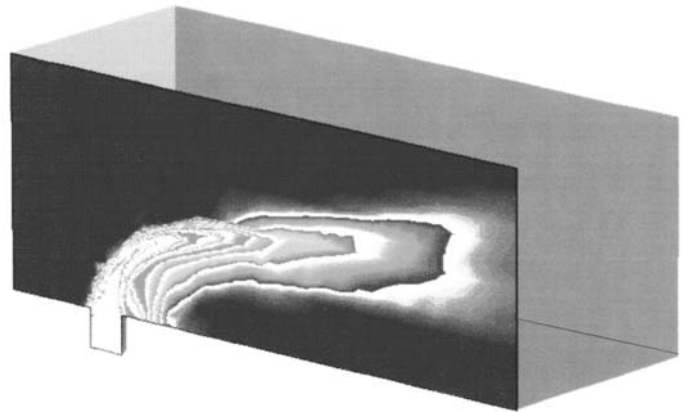


Figura 7 Campo de temperatura

IV. RESULTADOS OBTIDOS

Os seguintes resultados foram alcançados no desenvolvimento deste projeto:

Resultado 1: Caracterização da Performance Ambiental de uma UTE típica. A análise da eco-eficiência de uma UTE deveria ser diagnosticada através de metodologias que avaliem uma faixa relevante de potenciais cenários presentes na escolha da UTE, bem como na identificação da influência do combustível na eco-eficiência da Unidade.

Resultado 2: Mapeamento quantitativo das emissões gasosas em Termelétricas, através da análise da cinética química dos processos de combustão de gás natural, óleo e biomassa, permitindo a quantificação da produção de CO₂, CO, NO_x e SO_x, e de particulados através de modelos computacionais de ampla utilização na comunidade científica.

Resultado 3: Caracterização da Poluição Térmica oriunda de uma UTE, através da simulação computacional da pluma térmica resultante do rejeito térmico de ciclos térmicos das UTE's e o seu efeito no aquecimento do corpo d'água depositário deste rejeito. Identificação das modificações induzidas no ecossistema vizinho às instalações termelétricas.

V. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Abelson, P. *Project Appraisal and Valuation of the Environment: General Principles and Six Case-Studies in Developing Countries*. London: Macmillan Press Ltd, 1996.
- [2] Arrow, K.; Solow, R.; Portney, P. R.; Leamer, E.E.; Radner, R.; E Schuman, H. Report of the NOAA panel on contingent valuation. *Federal Register*, v.58, n. 10, p.4.601-4.614, January 15, 1993.
- [3] Assies, J. A., 1991, "Life -cycle assessment - State of the art", Workshop Report from the Society of Environmental
- [4] Aurelio, M, Gonçalves, M., 1998, "Environmental issues arising from the thermopower generation in Brazil", Elsevier Science Ltd
- [5] Borger, F. G. Valoração econômica do meio ambiente: aplicação da técnica avaliação contingente no caso da Bacia do Guarapiranga. Dissertação (mestrado). Programa de Pós-Graduação em Ciência Ambiental, USP, São Paulo, 1995.
- [6] Boustead, I., 1972, *The Milk Bottle*. Open University Press, Milton Keynes.
- [7] Consoli et al., 1993, *Guidelines for Life Cycle Assessment: A "Code of Practice"*. SETAC, Brussels, Belgium.
- [8] Cornwell D. A. ; Davis M. L.; (1991) *Introduction environmental engineering*, 2 nd Ed
- [9] Curran, M.A., 1996, *Environmental Life Cycle Assessment*. McGraw-Hill, USA.
- [10] Daily, G. C. *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Washington: Island Press, 1997.
- [11] Garnon, L., Belanger, C., 2001, "Life Cycle assessment of electricity generation options: The status of research in year 2001", Elsevier Science Ltd
- [12] Hanemann, W. M. *Valuing the Environment Through Contingent Valuation*. In: STAVINS, Robert N. *Economics of the Environment*. 4ª ed., New York: WW Norton & Company, Inc., 2000.
- [13] Hasund, K P. *Valuable Landscapes and Reliable Estimates*. In: DABBERT, S. et al. *The Economics of Landscape and Wildlife Conservation*. London: Cab International, 1998.
- [14] IEA Greenhouse Gas Programme, 1999, "Greenhouse Gas Emissions from Power Stations", Stoke Orchard, Cheltenham, Glos. GL52 4RZ, United Kingdom. Paul Freund - Project Director.
- [15] Krewitt, W.; (2002) *External Costs Of Energy-Do The Answers Match The Match The Questions? Looking Back At 10 Yeras Of Externe*.
- [16] Lechón, Y.; Cabal, H.; Gómez, M.; Sanchez, E; Saéz, R.; (2002) *Environmental Externalities Caused By SO2 and Ozone Pollution in the Metropolitan Area of Madrid*.
- [17] Lombardi, L., 2000, "LCA comparison of technical solutions for CO2 emissions reduction in power generation", Ph.D. Thesis, Dipartimento di Energetica Sergio Stecco, Università degli Studi di Firenze (Italy).
- [18] Mann, M.K.; Spath, P.L., 1997, "Life Cycle Assessment of a Natural Gas Combined-Cycle Power Generation System", National Renewable Energy Laboratory, Golden.
- [19] Meier, P.J., 2003, "Life Cycle Energy Cost and Greenhouse Gas Emissions for Gas Turbine Power", UWFD-1184.
- [20] Mitchell, R. C.; Carson, R. T. *Using Surveys to Value Public Goods: The Contingent Valuation Method*. Washington: Resources for the Future, 1993.
- [21] Mitchell, R. C.; Carson, R. T. *Using surveys to value public goods: the contingent valuation method*. Washington: Resource for the future, 1989.
- [22] Mota, J. A.. *O Valor da Natureza: Economia e política dos recursos naturais*. Rio de Janeiro: Garamond, 2001.
- [23] Mota, J. A.. *Valoração de Ativos Ambientais como Subsídio à Decisão Pública*. Tese de Doutorado. Brasília: Centro de Desenvolvimento Sustentável, Universidade de Brasília, 2000.
- [24] Pearce, D. W. *Economic values and the natural world*. Massachusetts: The MIT Press, USA, 1993.
- [25] Pearce, D. W.; Turner, R. K. *Economics of natural resources and the environment*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 1990.
- [26] Prugh, T.. *Natural Capital and Human Economic Survival*. Solomons: ISEE, 1995.
- [27] Reis, M. M. (2001) *Custos ambientais associados a geração elétrica: hidroelétrica x Termoelétrica à gas natural*. Rio de Janeiro, UFRJ, Tese de mestrado.
- [28] Santos, M. A.; Rodrigues, M.G.; (1999) *Environmental Issues arising from the thermopower generation in Brazil*. Rio de Janeiro, UFRJ, Paper.
- [29] Spath, P. L. and Mann, M. K., 2000, "Life Cycle Assessment of a Natural Gas Combined-Cycle Power Generation System", NREL Report TP-570-27715.
- [30] Sundstrom, G., 1973, "Investigation of the Energy Requirements from Raw Materials to Garbage Treatment for Four Swedish Beer Packaging Alternatives". Report for Rigello Park AB, Sweden.
- [31] *Toxicology and Chemistry - Europe*, 2-3 December, Leiden, the Netherlands.
- [32] White, S., 1999, "Energy Requirements and CO2 emissions in the construction and manufacture of Power Plant Materials - Working Draft", University of Wisconsin-Madison.