



AUTARQUIA ASSOCIADA À UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

**PROJETO PILOTO DO ETANOL - P P E
ALTERNATIVA ENERGÉTICA PARA SUBSTITUIÇÃO
PARCIAL OU TOTAL DO ÓLEO COMBUSTÍVEL EM
PLANTAS DE GERAÇÃO TERMOELÉTRICA**

JOÃO SIMÕES PESSOA

**Dissertação apresentada como parte dos
requisitos para obtenção do Grau de
Mestre em Ciências na Área de Tecnologia
Nuclear - Aplicações.**

**Orientadora:
Dra. Dora de Castro Rubio Poli**

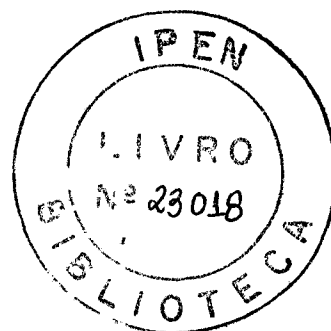
**São Paulo
2004**



INSTITUTO DE PESQUISAS ENERGETICAS E NUCLEARES
Autarquia associada à Universidade de São Paulo

PROJETO PILOTO do ETANOL - P P E
Alternativa energética para substituição parcial ou total
do óleo combustível em plantas de geração termoelétrica

JOÃO SIMÕES PESSOA



Dissertação apresentada como parte
dos requisitos para obtenção do Grau
de Mestre em Ciências na Área de
Tecnologia Nuclear – Aplicações.

Orientadora

Dra. Dora de Castro Rubio Poli

São Paulo
2004

Ao Senhor, por seu filho, nosso irmão.

Em memória de meu pai e ao amor de minha mãe.

Dedicado à minha mulher e aos nossos três filhos.

Agradecimentos ao amigo Omar Fernandes Aly pelo incentivo, à Dra. Dora de Castro Rubio Poli pela orientação, por sua dedicação e amizade, à Dra. Cely Paula da Silva (I. de Física, da USP), ao Dr. Valdir Sciani e Dr. Nelson Leon Meldonian (IPEN-SP) pela atenção e apoio à esta realização, ao IPEN / CNEN –SP e à USP pela oportunidade, destacando o apoio recebido do Dr. Wanderley de Lima, Sandra Filgueiras e pessoal do Centro de Aceleradores Ciclotron; bem como o da Sra. Edna e equipe da biblioteca e a ajuda inestimável do Dr. Fernando Moreira e das Sras Ilze, Vera e Ana da CPG; e ao corpo docente, pelo exemplo de dedicação ao ensino, não esquecendo dos colegas e amigos da UTP que participaram do Projeto Piloto do Etanol.

PROJETO PILOTO do ETANOL - P P E

Alternativa energética para substituição parcial ou total
do óleo combustível em plantas de geração termoelétrica

João Simões Pessoa

RESUMO

O atual estágio do desenvolvimento tecnológico está fundamentado na ampla utilização do petróleo e seus derivados, cujo mercado define regras e interações sócio-econômicas e a geo-política; e o quadro energético mundial se estabeleceu por força do binômio “ampla disponibilidade – baixo custo”, capaz de restringir iniciativas para aproveitamento de fontes energéticas naturais (geotermia, solar, maré-motriz, eólica) ou para desenvolvimento de novas alternativas de caráter renovável (bio-combustíveis), e cujas alterações, essencialmente decorrentes de questões econômico-financeiras, são capazes de incorrerem em oportunidades reais para mudanças nas matrizes energéticas e na estrutura tecnológica. No Brasil a Agenda 21 e, em particular, o Programa de Pesquisa Aplicada na Área Energética – PPA, do Ministério de Minas e Energia, objetivam a execução de estudos de casos e a implantação de projetos pilotos para o desenvolvimento do uso de fontes convencionais e alternativas renováveis de energia, o que resgata para a atualidade o mérito deste projeto, desenvolvido entre 1979 e 1980, para avaliação da viabilidade técnica da utilização do álcool etílico como combustível complementar ou em substituição direta ao óleo combustível utilizado em caldeiras aquatubulares de unidades convencionais de geração termoelétrica. Neste trabalho procurou-se reunir os principais dados sobre os equipamentos da planta e as informações sobre o desempenho técnico obtido através de experimentação direta em uma das caldeiras da Usina Termoelétrica Piratininga, da combustão do álcool etílico em substituição ao óleo combustível.

ETHANOL PILOT PROJECT

An energy alternative project for a total or partial substitution
of fuel oil in thermo electric generation plants

João Simões Pessoa

ABSTRACT

The actual stage of technological development is strongly dependent on wide use of petroleum combustibles, in which its trade market defines the rules of socio-economical and geo politics interdependencies. The economic growth has been driven by the “readily available – cheap energy” stimulus, limiting studies on natural sources of energy (geothermic, solar) and development of renewable ones (bio combustibles). However, economical, financial crisis may change this scenario, and new opportunities for a change in the technological matriz and in technological structure might occur. In Brazil, the “Agenda 21”, especially the PPA – Applied Research program in the Energetic Area (“Programa de Pesquisa Aplicada na Área Energética”), intend to develop case studies and implement “pilots projects” to research conventional and renewable sources of energy, bringing to present the value of this project, developed between 1979 and 1980, to evaluate the technical feasibility of ethylic alcohol utilization as a complementary combustible or in a total substitute for the fuel oil in boilers of conventional thermoelectric generation plants. This work presents the performance of one of the Piratininga Thermal Power Plant’s boiler, as well as the main data acquired from direct experimentation and the characteristics of this plant, from the use of ethylic alcohol as a substitute of fuel oil.

SUMÁRIO

	página
1 INTRODUÇÃO.....	01
2 IMPACTO AMBIENTAL DAS EMISSÕES AÉREAS DEVIDAS AO ENXOFRE DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS	03
3 POLUIÇÃO POR USINAS TERMOELÉTRICAS A ÓLEO COMBUSTÍVEL OU CARVÃO	16
4 HISTÓRICO DA USINA PIRATININGA	22
4.1 Descrição sucinta dos principais equipamentos de uma unidade da UTP	25
4.2 Cuidados operacionais básicos e o desenvolvimento tecnológico	37
5 QUADRO ENERGÉTICO E PESQUISAS DE COMBUS- TÍVEIS ALTERNATIVOS	41
6 HISTÓRICO DO PROJETO PILOTO DO ETANOL	44
7 ETAPAS DO PROJETO	47
7.1 Etapa de levantamento de dados sobre combustíveis	47
7.2 Etapa de levantamento de dados técnicos sobre equi- pamentos, definição do ante-projeto e ensaios indivi- dualizados de dispositivos	54
7.3 Etapa de desenvolvimento e implantação física dos equipamentos	61
7.4 Etapa de ensaios em carga	68
8 ENSAIO COMPLEMENTAR	72
9 CONCLUSÕES	76
APÊNDICE A: relatórios do P P E.....	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	100

1 INTRODUÇÃO

O atual estágio do desenvolvimento tecnológico está fundamentado na ampla utilização do petróleo e seus derivados, cujo mercado define regras e interações sócio-econômicas e a geo-política. O quadro energético mundial se estabeleceu por força do binômio “ampla disponibilidade – baixo custo”, capaz de restringir as iniciativas para aproveitamento de fontes energéticas naturais (geotermia, solar, maré-motriz, eólica) ou para o desenvolvimento de novas alternativas de caráter renovável (bio-combustíveis).

A ratificação de tratados para proteção ambiental e o estabelecimento de legislação específica e sobretudo, as ações de grupos e entidades ambientalistas, vêm pouco a pouco influenciando a opinião pública para uma revisão dos valores e da estrutura da sociedade tecnológica dependente do petróleo.

Todavia são essencialmente questões econômico-financeiras que vêm promovendo alterações neste cenário, a se destacarem os choques dos preços internacionais do petróleo (1973 e 1978) e acordos para o controle das regiões produtoras do Oriente Médio (camufladas por ações internacionais para intervencionismo militar anti-terrorista e para a resolução da Questão Palestina), que denotam estar se encerrando o período dos preços baixos e dos desperdícios; ocorrendo portanto uma oportunidade real para mudanças no quadro energético mundial e na estrutura tecnológica. Em todo o mundo publicações divulgam artigos ressaltando que apesar da descoberta de novas regiões produtoras no Ártico, (BREMEN Magazine, nº 11) capazes de sustentar os atuais patamares de consumo de petróleo e seus derivados, está-se na iminência de um período ainda de disponibilidades mas no qual a civilização optará por reinvestir no desenvolvimento dos aproveitamentos de outras fontes energéticas (Revista Veja, edição nº 1857).

No Brasil a Agenda 21 e em particular o Programa de Pesquisa Aplicada na Área Energética – PPA, do Ministério de Minas e Energia, objetivam a execução de estudos de casos e a implantação de projetos pilotos para o desenvolvimento do uso de fontes convencionais e alternativas renováveis de energia, o que resgata para a atualidade o mérito deste projeto, desenvolvido entre 1979 e 1980, para avaliação da viabilidade técnica da utilização do álcool etílico como combustível complementar ou em substituição direta ao óleo combustível utilizado em caldeiras aquatubulares de unidades convencionais de geração termoeleétrica.

Neste trabalho procurou-se reunir os principais dados sobre os equipamentos da planta e as informações sobre o desempenho técnico obtido através de experimentação direta em uma das caldeiras da Usina Termoeletrica Piratininga, adaptada como plataforma dos testes que culminaram com a operação plena da unidade geradora em modo comercial no atendimento ao Sistema Elétrico Interligado, a partir da combustão do álcool etílico em substituição ao óleo combustível. Estes registros constituem a memória técnica do Projeto Piloto do Etanol – PPE, considerado na época como inovador e portanto fato relevante na pesquisa tecnológica nacional, contribuindo para a gestão do conhecimento, fundamental para os novos projetos de pesquisa e desenvolvimento de fontes alternativas de energia a serem promovidos no país. Foram inseridos tópicos como uma breve explanação sobre os aspectos ambientais relativos aos principais produtos da queima do óleo combustível e sobre a importância da redução nos níveis de emissões de poluentes à atmosfera, e citadas algumas propostas para “adequação ambiental” da Usina operando com óleo, bem como algumas pesquisas que vêm sendo desenvolvidas na área, sem incorrer numa ampla explanação sobre as questões ambientais decorrentes da combustão de energéticos de origem fóssil, de modo a não transcender ao escopo deste trabalho que considera ser pertinente que neste momento se proceda a novo estudo, para análise da viabilidade técnico-econômica, uma vez que à época do projeto não foram considerados aspectos como o da sustentabilidade.

2 IMPACTO AMBIENTAL DAS EMISSÕES AÉREAS DEVIDAS AO ENXOFRE DOS COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

O enxofre é um constituinte natural de todos os combustíveis fósseis e, durante a combustão, a maior parte (da ordem de 95% do enxofre orgânico presente no carvão e mais de 99% do enxofre presente nos combustíveis líquidos – EPSTEIN,1990) acaba sendo convertida em compostos sulfurosos gasosos que serão lançados à atmosfera (LIMA et al.,2002) se não houver equipamento ou processo dedicado para controle ou eliminação dessas emissões (POLI et al., 1993; 1995).

O enxofre forma uma série de óxidos, como o SO, SO₂, S₂O₃, SO₃, S₂O₇ e o SO₄, mas apenas o dióxido de enxofre (SO₂), o trióxido de enxofre (SO₃) e o íon sulfato têm importância como poluentes. O SO₃ forma o ácido sulfúrico ao combinar-se rapidamente com a água e, por apresentar baixo ponto de orvalho, produz danos já nas próprias chaminés caso não estejam adequadamente preparadas, reagindo quando na presença de metais ou amônia, formando sulfatos metálicos, de amônia ou mistos (EPSTEIN,1990).

O trato das questões ambientais conduz a uma primeira atitude que é a substituição ou a utilização de combustíveis fósseis com menores teores de enxofre nas regiões urbanas, de modo a eliminar ou atenuar os efeitos dos compostos sulfurosos gasosos sobre a população.

EPSTEIN,1990 destaca que estudos realizados em termoeletrica a carvão mostraram que de 92 a 94% do enxofre emitido pela chaminé aparece na forma de SO₂; menos do que 1% na forma de SO₃ como aerossol ou partículas

muito finas, com diâmetros da ordem de décimos de microns; e até 3% na forma de SO_4 (sulfatos) que, por terem dimensões de alguns microns, podem ser em grande parte captados por precipitadores eletrostáticos e têm origem na oxidação catalítica do SO_2 na superfície do material particulado volante, que contém metais que produzem o SO_3 que reage com metais formando o sulfato metálico. O SO_2 é um gás incolor com cheiro irritante, sendo altamente solúvel em água (11,3g /100 ml) formando o ácido sulfuroso (H_2SO_3), se oxidando lentamente para SO_3 ao ar limpo, sendo esta oxidação mais rápida na presença de aerossóis aquosos na atmosfera. Íons de metais pesados em solução catalisam a reação, que cessa quando o aerossol se torna ácido. A amônia presente na atmosfera neutraliza o ácido, formando bissulfito que rapidamente se oxida para sulfato, e se a quantidade de amônia na atmosfera for suficiente, tem-se a total neutralização do ácido, caso contrário haverá um resíduo ácido que aparecerá na próxima chuva. A concentração do SO_2 é dada em ppm (partes por milhão) ou $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (microgramas/ m^3 de ar) e 1 ppm corresponde a 2620 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ de ar.

O impacto ambiental das emissões aéreas desses poluentes dependerá localmente tanto das emissões de outras fontes próximas quanto da altura da chaminé da instalação considerada, enquanto que regionalmente dependerá somente das emissões globais na região e não das características da chaminé. Este aspecto foi estudado por BARRETO NETO e por POLI et al.,2000 quando avaliaram as emissões da Usina Termoelétrica Piratininga - UTP, instalada na região metropolitana de São Paulo, operando com óleo combustível, e que sofrem grande dispersão e diluição antes de atingir o ambiente da superfície terrestre, uma vez que dispõe de chaminés mais elevadas dos que as instalações industriais próximas, comprovando-se o evento de que uma instalação industrial com pequena emissão mas com uma chaminé baixa pode causar impacto local mais acentuado do que o causado por uma termoelétrica com chaminé elevada, pois produzirá localmente uma alta concentração de poluentes aéreos que são emanados ao nível do solo.

Em 1990 as termoeletricas nos EUA eram responsáveis por 18% das emissões globais de SO_2 (EPSTEIN,1990) mas este quadro vinha se alterando em função das medidas tomadas até então pelo governo americano para seu controle. No Brasil, a utilização do gás natural em substituição ao carvão e ao óleo combustível em usinas convencionais, mesmo os de baixos teores de enxofre, está sendo uma opção para atenuação dos problemas ambientais dos grandes centros urbanos (SAMPA et al.,1993), permitindo a adequação de instalações como a UTP aos padrões ambientais (ZANCHETA et al.,2004) .

Muitos dos efeitos ambientais atribuídos ao SO_2 são na realidade devidos aos sulfatos originados do dióxido de enxofre emitido pelo homem. Os sulfatos artificiais observados na atmosfera, ou são emitidos pelas chaminés já na forma de sulfatos (incluindo ácido sulfúrico), sendo então denominados poluentes primários, ou serão constituídos na atmosfera a partir das reações químicas sofridas pelo SO_2 , sendo então chamados como poluentes secundários. EPSTEIN,1990 ainda salienta que experimentos com animais mostraram que os sulfatos são extremamente mais irritantes ao trato respiratório do que o SO_2 ; que o ácido sulfúrico possui o maior poder de dano, seguido pelos sulfatos metálicos, e dentre estes, os de metais de transição são os mais tóxicos; que o ácido sulfúrico livre e os sulfatos metálicos estão presentes na razão de 3 a 5% dos sulfatos medidos nas grandes cidades americanas, podendo ser maior nas proximidades de grandes fontes de SO_2 ; e que medições mostraram que o sulfato de amônia que compõe mais de 80% dos sulfatos atmosféricos, tem pouco efeito tóxico. Destaca também que, por serem principalmente poluentes secundários, os sulfatos podem aparecer em altas concentrações a centenas de quilômetros das fontes poluidoras, sendo difícil reduzir-se suas concentrações ambientais devido ao desconhecimento das fontes poluidoras; que todas as evidências indicam que os sulfatos primários originam-se quimicamente da oxidação do SO_2 na presença de oxidantes fotoquímicos e de catalisadores, tendo estes um papel fundamental; e que a queima de óleo combustível produzirá de 5 a 10 vezes mais sulfatos primários do que a queima de carvão com o mesmo teor de enxofre, decorrentes da presença de

vanádio e do níquel, que servem de catalisadores para a reação. O material particulado resultante dessa queima de óleo combustível conterá na sua superfície 20 vezes mais sulfatos e 10 vezes mais ácido sulfúrico livre que no material particulado lançado pela queima de carvão, pois as medições mostraram que a oxidação do SO_2 em sulfatos ocorre basicamente na superfície do material particulado submicrônico, que possui uma área por peso muito maior do que a das partículas micrônicas, sendo a oxidação mais intensa na presença de vanádio (esta combinação de partículas submicrônicas e vanádio, encontrada principalmente nas centrais termoeletricas convencionais operadas a óleo combustível foi tema de diversos trabalhos técnicos de BARRETO NETO).

O teor de ácido sulfúrico e demais sulfatos primários numa pluma proveniente da queima de óleo combustível está associado à presença de catalisadores e ao excesso de O_2 na combustão, uma vez que, em se diminuindo o teor de O_2 reduz-se consideravelmente a formação de ácido sulfúrico aumentando em contrapartida o teor de material particulado nessa pluma. Quanto aos sulfatos secundários, experimentos e medições mostram que a formação pela oxidação do SO_2 na atmosfera se deve à presença de catalisadores e, principalmente, de oxidantes fotoquímicos. Por ser a velocidade de oxidação do SO_2 bastante acelerada durante os dias de intensa insolação, os processos fotoquímicos são mais intensos no período de verão, na razão horária da ordem de 1 a 3 % nos dias ensolarados, devido provavelmente aos radicais livres produzidos fotoquimicamente nas reações entre NO_x e hidrocarbonetos lançados por chaminés; enquanto que, durante o inverno ou nas primeiras horas da manhã, mesmo no verão, essa razão de oxidação será inferior a 0,5% do SO_2 por hora. As reações fotoquímicas com NO_x podem levar à altas concentrações de ozônio, O_3 , aumentando a razão de formação de sulfatos (EPSTEIN,1990). Os compostos de enxofre, permanecendo na atmosfera ou sendo carregados pela chuva, acabarão por causar impactos consideráveis sobre bens materiais, vegetação, animais e a saúde do próprio homem, ou sobre as condições de visibilidade em regiões de altas concentrações, a saber :

a) Impacto sobre bens materiais

O dióxido de enxofre presente na atmosfera é o maior causador de corrosão em metais expostos ao ar, havendo uma relação linear entre a quantidade de metal corroído num dado período de tempo e a concentração de SO_2 . Até mesmo metais não-ferrosos, como o zinco usado na galvanoplastia para proteção do ferro, embora em menor escala, acabam por serem atacados pelo SO_2 , que provoca também o aparecimento de uma camada superficial de sulfato de cobre que é prejudicial quando ocorre sobre contatos elétricos de cobre, que têm sua resistividade alterada. Nas áreas operacionais da Usina Termoelétrica Piratininga a formação de finas camadas de sulfatos sobre contatos de computadores e outros aparelhos eletrônicos, prejudica o funcionamento e requer constantes ações de manutenção ou a utilização de aparelhos contendo contatos de ouro ou platina ou especialmente acondicionados; bem como se constatarem ocorrências sobre a pintura, em estruturas metálicas como as da subestação de energia anexa ou nas superfícies dos diversos equipamentos e instalações, bastante danificadas pela ação do SO_2 , sendo freqüentes as re-pinturas dessas superfícies, mesmo com a utilização de tintas à base de nitrocelulose/acrílico; uma atividade diretamente supervisionada pelo Laboratório Químico.

b) Impacto sobre a vegetação

A devastação, num raio de vários quilômetros, das florestas existentes ao redor de usinas de beneficiamento de cobre originou os primeiros estudos sobre os efeitos dos poluentes na vegetação. Os efeitos do SO_2 sobre as plantas podem ser visíveis, pois ou resultam em uma pigmentação anômala, com mudanças morfológicas e até necrose, ou apenas no embranquecimento das folhas. Experiências laboratoriais demonstram que plantas sensíveis ao SO_2 sofrem decréscimo de até 5% no seu crescimento quando expostas à uma concentração de no mínimo 0,5 a 2,0 ppm desse poluente por uma hora, limite utilizado para

estabelecer os níveis máximos permitidos do poluente no ar. Observou-se também que quanto maior o tempo de exposição menor será a concentração à qual a planta pode ser submetida sem graves danos, sendo considerado que abaixo de 0,2 ppm de SO₂ a maior parte das plantas não sofreria danos mesmo após longa exposição. Problemas como o menor crescimento e uma redução na produção só poderão ser detectados se houverem plantas-controle que cresçam na mesma região, desde que protegidas da poluição, para viabilizar uma comparação. A ocorrência da chuva ácida retarda o crescimento das plantas pois o contato direto da chuva com as folhas faz com que sejam arrastados nutrientes indispensáveis ao desenvolvimento da planta. Por sua vez a acidificação do solo também afeta sua química e bioquímica, sendo lixiviados metais como alumínio e manganês que entram em contato com as raízes das plantas, para as quais são tóxicos, enquanto o cálcio e o magnésio do solo são transformados em sulfatos insolúveis, restringindo suas disponibilidades para as raízes (EPSTEIN,1990).

O SO₂ influi na reprodução dos vegetais. No hemisfério norte é comum ocorrer a cultura de milho, girassol, algodão ou tabaco em áreas próximas à termoeletricas, por serem plantios “beneficiados” pelas maiores concentrações atmosféricas de SO₂, uma vez que essas culturas apresentam como característica a grande necessidade de enxofre e para as quais o poluente acaba por tornar-se um fertilizante. EPSTEIN,1990 destaca ser generalizado na Europa e nos EUA o uso de plantas sensíveis ao SO₂, principalmente a alface e flores ornamentais, como monitores ambientais e que deve ser evitado o uso das diversas espécies de pinus, para a implantação de cinturões verdes. A sensibilidade ao SO₂ dependerá das condições climatológicas, do solo e da idade das plantas entre outros fatores, e dentre as culturas sensíveis à chuva ácida tem-se a alfafa, o centeio, a aveia, a soja e o trigo; dentre as plantas de jardim tem-se o feijão, o brócoli, a cenoura, a alface, o espinafre, o pepino e o tomate; dentre as flores, tem-se a áster, a violeta e a zínia; e dentre as árvores tem-se a macieira, o olmo, e principalmente os pinheiros, estes as maiores vítimas da chuva ácida.

Alguns dos efeitos das chuvas ácidas são prontamente verificados nas áreas rurais pois a chuva ao cair sobre as folhas provoca, inicialmente, uma mancha bronzeada visível em poucas horas, ocorrendo no dia seguinte pontos de necrose bifaciais. A lesão foliar por chuva ácida caracteriza-se pelo embranquecimento das folhas, afetando o aspecto visual do vegetal e diminuindo o seu valor de venda. Todavia é possível que não sejam observados danos às folhas mas sim um crescimento retardado da planta, uma vez que as concentrações de enxofre nas chuvas ácidas, necessárias para reduzir o crescimento das plantas, são bastante inferiores às concentrações necessárias para produzir efeitos visíveis, de modo que alguns dos efeitos das chuvas ácidas serão sutis e só aparecerão após vários anos. O principal efeito será a redução da taxa de crescimento das florestas, uma vez que a chuva ácida afetará a germinação das sementes de coníferas, afetará a disponibilidade de nitrogênio no solo, diminuirá a “respiração” do solo e aumentará a lixiviação dos nutrientes presentes no solo original.

c) Impacto sobre animais e eco-sistemas

Pequenos animais podem morrer quando submetidos a concentrações de SO_2 cerca de cem vezes superiores às concentrações ambientais, enquanto concentrações cerca de cinquenta vezes superiores às ambientais produzem pouco efeito sobre animais de grande porte (EPSTEIN,1990). Embora parcela da comunidade científica questione o real efeito das chuvas ácidas sobre o meio ambiente, fato é que lagos não poluídos contêm dissolvidos bicarbonatos de cálcio e magnésio que regulam oscilações bruscas de pH, e que a ocorrência de chuvas ácidas teria destruído essa capacidade dos lagos de manter o pH constante, pois os bicarbonatos seriam substituídos por sulfatos, resultando numa crescente acidificação dos mesmos, ocasionando dessa forma o desaparecimento gradual dos peixes por efeito do ácido sobre as ovas, que requerem meio neutro para se desenvolver, e pela mudança no conteúdo de sal na água, pois os peixes exigem um conteúdo mínimo para se desenvolverem.

Outras espécies também seriam afetadas pelas chuvas ácidas, como populações de bactérias, algas e invertebrados que seriam reduzidas, interferindo na decomposição da matéria orgânica depositada nos fundos dos lagos e no ciclo formador de nutrientes, fundamentais para a vida no meio aquático. As chuvas ácidas também provocam a dissolução de elementos tóxicos, e concentrações elevadas de Al, Mn, Zn, Cd, Pb, Cu e Ni, metais que produzem danos aos peixes, por vezes levando-os à morte, têm sido encontradas em lagos acidificados.

d) Impacto sobre a saúde humana

Os efeitos do SO_2 sobre a saúde humana só podem ser constatados de maneira indireta, por estudos epidemiológicos ou por experimentos com animais. O efeito aparente do SO_2 sobre o homem e os animais é o aumento na frequência da respiração, aumento da resistência ao fluxo de ar, diminuição do volume de ar aspirado, irritação aguda do trato respiratório superior e da conjuntiva e agravamento dos casos de asma e problemas cardiopulmonares. Concentrações de SO_2 iguais às encontradas nas grandes cidades por si só causariam pouco efeito sobre a respiração, o que faz com que vários pesquisadores admitissem que o SO_2 não seria o poluente que deveria ser monitorado, mas tão somente a manifestação de problemas causados por outro(s) poluente(s), uma vez que os efeitos respiratórios seriam produzidos pelos sulfatos e pelo ácido sulfúrico, que produzem inflamações das vias respiratórias e diminuem a velocidade de remoção do muco acumulado no sistema respiratório (EPSTEIN,1990). Para CASTANHO,1999 a atmosfera de um centro urbano é constituída por gases e partículas sólidas ou líquidas, sejam poluentes ou não, mas em concentrações que excedem às naturais da atmosfera, sendo emitidas por fontes móveis ou fixas; e que sob diferentes condições meteorológicas de pressão, temperatura, umidade e radiação solar, sofrem reações químicas formando poluentes adicionais aos emitidos. Considera ainda ser a poluição atmosférica em centros urbanos comprovadamente prejudicial à saúde da população exposta, o que gera uma

preocupação mundial acerca deste tema, e em especial sobre a região metropolitana de São Paulo, por possuir características geográficas e climáticas desfavoráveis à dispersão de poluentes, capaz de atingir elevadas concentrações durante os períodos de inverno e níveis de material particulado inalável e gases poluentes tóxicos à saúde da população e cancerígenas, comprovados por estudos epidemiológicos, que incorrem no aumento da morbidade e mortalidade da população durante episódios de altas concentrações de particulado inalável.

LANDI et al.,2001 destacaram que as principais fontes emissoras de poluentes na região metropolitana de São Paulo são as fontes móveis e algumas indústrias. O que diferencia basicamente o comportamento da poluição atmosférica são as condições do clima, que afetam diretamente a concentração de espécies na atmosfera, através do efeito na circulação atmosférica e indiretamente, atuando nas reações químicas, pela variação de temperatura e radiação solar, e que, quaisquer sejam as mudanças climáticas, resultarão diretamente em impactos na saúde humana (pelas próprias condições atmosféricas) e indiretamente pelas condições de dispersão dos poluentes atmosféricos

Quanto às observações em locais contaminados com SO_2 EPSTEIN,1990 destaca que os sulfatos são muito mais tóxicos que o SO_2 , pois a oxidação deste para sulfatos, feita em laboratório, aumentou sua toxidez em 20 vezes, mas que nem todos os sulfatos são irritantes no mesmo grau pois se o tamanho da partícula for o mesmo, em ordem decrescente de toxidez tem-se o ácido sulfúrico, sulfato de amônia e zinco, sulfato de zinco e sulfato de amônia; e que o tamanho das partículas de sulfato é o fator crítico na determinação do grau de irritação. Por exemplo, para partículas de 0,8 microns (milionésimo do metro) o ácido sulfúrico é duas vezes mais tóxico que o sulfato de amônia e zinco. Este último, no entanto, sob a forma de partículas de 0,3 microns é três vezes mais tóxico do que o ácido sulfúrico na forma de spray de 0,8 microns.

CASTANHO,1999 destaca que na região metropolitana de São Paulo o SO_2 apresenta um pico de $80 \mu\text{m} / \text{m}^3$ de concentração média na parte da manhã, em todos os dias da semana, o que demonstra ter origem predominantemente na emissão industrial. O SO_2 se transforma em partículas de sulfato ou é absorvido na superfície de partículas existentes formando sulfatos ou ácido sulfúrico

Duas hipóteses explicam o efeito do SO_2 (ou seus derivados) sobre a resistência ao fluxo pulmonar. Na primeira o mecanismo é a liberação de substâncias bronco-constritivas por reação química no trato inferior, e experimentos in-vivo e in-vitro mostraram que, na presença de ácido sulfúrico e de sulfatos, o SO_2 provoca a liberação de histamina no trato respiratório inferior; enquanto que na segunda, o mecanismo proposto é o do estímulo de receptores no trato respiratório superior, pois o SO_2 absorvido nesta região, que é anatomicamente isolada do trato inferior, irá produzir um aumento na resistência do fluxo no pulmão por estimulação do nervo vago; este efeito pode ser cessado, interrompendo-se ou bloqueando-se este nervo. Estudos epidemiológicos realizados com crianças demonstram haver correlação entre infecções no trato respiratório inferior e níveis de poluição, e que se observam efeitos adversos quando a concentração média anual de SO_2 ultrapassa $130 \mu\text{g}/\text{m}^3$, enquanto outros estudos concluem que altas concentrações de SO_2 e sulfatos produzem efeitos em crianças principalmente após no mínimo três anos de exposição à atmosfera poluída. Em geral os estudos mostram que a relação entre poluição e saúde envolve um grande número de fatores tais como existência simultânea de mais de um poluente, condições sócio-econômicas e hábitos de fumo, sendo muito difícil determinar com certeza a influência de um poluente (EPSTEIN,1990).

ARBEX,2001 destaca que o Laboratório de Poluição Atmosférica Experimental do Departamento de Patologia da Faculdade de Medicina da Universidade de São Paulo - LPAE foi o pioneiro em nosso país na avaliação dos efeitos tóxicos dos poluentes emitidos pela utilização de combustíveis fosseis nos grandes centros urbanos, e o primeiro na avaliação dos efeitos tóxicos da

combustão do álcool, da mistura álcool-gasolina e efeitos da poluição do ar pela queima da biomassa.

LANDI, 2001 por sua vez coordenou, a pedido da Coordenadoria Estadual de Defesa Civil na Região Metropolitana de São Paulo, estudo que resultou no documento no qual destaca o trabalho realizado pelo LPAE, no que se refere às avaliações :

- a) as concentrações de poluentes atmosféricos encontrados em grandes cidades acarretam afecções agudas e crônicas no tracto respiratório, mesmo em concentrações abaixo do padrão de qualidade do ar. É maior a incidência de patologias, tais como asma e bronquite, esta em associação com a poluição atmosférica;
- b) a mortalidade por patologias do sistema respiratório apresenta uma forte associação com a poluição atmosférica;
- c) as populações mais vulneráveis são as crianças, idosos e aqueles que apresentam doenças respiratórias;
- d) o material particulado inalável, com dimensão inferior a 10 μm , e mais recentemente 2,5 μm , é apontado como o poluente mais freqüente - mente relacionado com danos à saúde;
- e) sinais, cada vez mais evidentes, mostram serem os padrões de qualidade do ar inadequados para a proteção da população mais susceptível à poluição atmosférica. Vários estudos demonstram ocorrência de efeitos mórbidos em concentrações abaixo dos padrões de qualidade do ar;

- f) a mortalidade por doenças cardio-vasculares também tem sido relacionada à poluição atmosférica urbana, sendo novamente o material particulado inalável o poluente freqüentemente associado;
- g) estudos experimentais e toxicológicos têm dado sustentação aos resultados encontrados em estudos epidemiológicos.

As crianças e os idosos geralmente são os mais afetados nos episódios de poluição do ar, principalmente aqueles que já sofrem de problemas respiratórios (bronquite) ou cardíacos. Durante períodos com altas concentrações de poluentes, a morte de doentes cardíacos se dá em maior número nos primeiros dias, caindo drasticamente nos dias posteriores, enquanto que para os doentes do trato respiratório, as mortes só ocorrem a partir do segundo ou terceiro dia, mas aumentando em numero com o tempo (EPSTEIN,1990).

e) Impacto sobre condições de visibilidade atmosférica

As condições de visibilidade atmosférica, ou seja a capacidade de distinguirmos objetos de cores diferentes situados a grande distância, são afetadas pelas emissões de SO_2 , pois a gradual oxidação aumenta a concentração de sulfatos na atmosfera. Como os aerossóis contendo sulfatos têm dimensão da ordem de 0,1 a 1,0 microns e a luz visível tem comprimento de onda com estas dimensões, a luz será fortemente espalhada por estes sulfatos, diminuindo a visibilidade. A razão horária de transformação do SO_2 para sulfatos é bastante variável, mas estimativas podem ser feitas tomando-se o valor de 0,2 a 1,5% por hora, o que faz com que a bruma numa região possa ser causada pelo SO_2 emitido a centenas ou milhares de quilômetros do local, tornando bastante difícil a identificação das fontes poluidoras. O poder espalhador dos aerossóis está relacionado com a umidade do ar e sua composição química. Ainda segundo

EPSTEIN, 1990 foi constatada uma relação entre a concentração máxima de ozônio durante o dia e o teor de sulfatos responsáveis pela perda de visibilidade, mais acentuada em dias com umidade relativa do ar superior a 70%, mostrando o caráter fotoquímico da geração de sulfatos. Relata ainda que, em pesquisa da Organização Mundial da Saúde, observou-se perda de visibilidade para concentrações de SO_2 e material particulado (MP) acima de $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$, umidade do ar acima de 50% e alta temperatura, e que os efeitos óticos devidos ao SO_2 e aos sulfatos não devem ser confundidos com alterações na atmosfera devidas a outros poluentes.

Como as termoelétricas a carvão ou óleo combustível potencialmente são fontes de sulfatos para a atmosfera, recomenda-se que antes da implantação da usina seja analisada a visibilidade da região do empreendimento, através de fotografias, contraste, telefotometria ou transmissometria, para avaliar as condições ambientais do local; compondo documentação necessária para obtenção do licenciamento ambiental e constituindo prova de defesa contra eventuais ações demandadas em função efeitos atmosféricos negativos a estas imputáveis e que já podem estar ocorrendo na região devido a outras fontes de poluição situadas a centenas de quilômetros .

3 POLUIÇÃO POR USINAS TERMOELÉTRICAS A ÓLEO COMBUSTÍVEL OU CARVÃO

O desenvolvimento tecnológico industrial ocorrido no século passado foi decorrente da intensificação do uso dos combustíveis fósseis, especificamente dos derivados de petróleo e do carvão que, quando queimados, lançam à atmosfera gases e material particulado em concentrações que prejudicam a vida vegetal e animal; além de serem causadores de inúmeros danos associados a processos corrosivos em virtude do uso indiscriminado de combustíveis contendo em sua composição elevadas quantidades de enxofre, impureza de difícil eliminação. Várias “metodologias” vêm sendo adotadas, com maior ou menor resultado, para evitar-se ou ao menos minimizar a ocorrência deste tipo de poluição ambiental, consistindo na queima de combustíveis com baixos teores de enxofre, na implantação de sistemas para dessulfurização dos gases de combustão ou na instalação de chaminés de altura elevada, cada qual com suas vantagens e desvantagens; o que atesta que durante muitos anos essa questão já vinha sendo tratada embora sem o devido “rigor” que passará a marcar os novos processos para licenciamento ambiental.

A ciência registra várias formas de poluição ambiental, notadamente a atmosférica, e as graves conseqüências sobre o equilíbrio planetário, e a instalação de vários fóruns que têm debatido esta questão, cabendo a todos e não só aos países industrializados, ainda que por dever moral e ético, contribuir nas ações por ser questão de sobrevivência global, direcionando esforços e recursos tecnológicos disponíveis para efetivamente controlar e até reduzir as emissões desses poluentes. Destaque para a Agenda 21, um plano de ação estratégico, que propõe padrão de

desenvolvimento conciliando métodos de proteção ambiental, justiça social e eficiência econômica. Trata-se de decisão consensual extraída de documento de 40 capítulos, para o qual contribuíram governos e instituições da sociedade civil de 179 países, envolvidos por 2 anos em um processo preparatório que culminou com a realização da Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente e Desenvolvimento – CNUMAD, em 1992, no Rio de Janeiro, conhecida por Eco-92. Embora sendo um ato internacional sem caracter mandatório, a ampla adesão aos seus princípios favorece a inserção de novas posturas frente aos usos dos recursos naturais, alteração de padrões de consumo e a adoção de tecnologias mais brandas e limpas, representando uma tomada de posição dos signatários ante a presente necessidade de assegurar a manutenção da qualidade do ambiente natural e dos complexos ciclos da biosfera (BRASIL-MMA,2004).

Todavia, restrições políticas e sobretudo de natureza econômica e potencialmente associáveis ao mercado internacional de petróleo, procuram justificar adiamentos ou a adoção de atuações parciais por parte de alguns países, em função de ações de defesa de suas soberanias ou pela imposição pura e simples de seu poderio, alegando-se haverem controvérsias com relação à real ocorrência de danos ambientais, interferências no equilíbrio planetário ou sobre quais são as concentrações que efetivamente causem perturbações à saúde.

RODRIGUES,1983 salienta que ao avaliar a poluição devido aos combustíveis fósseis, deve-se também atentar para outros poluentes gasosos, como o CO, CO₂, óxidos de azoto e hidrocarbonetos, além dos dióxido e trióxido de enxofre e os aerossóis diversos; classificáveis como sendo material particulado sólido (cinzas, fumos, pós minerais, pólen, bactérias, vírus e fungos) ou material particulado gasoso (detergentes, desodorizantes, odorizantes, névoas e neblinas). Já CASTANHO,1999 destaca que os gases poluentes são emitidos diretamente pelas fontes, como o NO_x (óxidos de nitrogênio), SO_x (óxidos de enxofre), CO (monóxido de carbono), CO₂ (dióxido de carbono), NH₃ (amônio), CH₄ (metano) e carbonos orgânicos voláteis (VOCs - Volatile Organic Compounds); ou são

decorrentes de reações químicas e fotoquímicas na atmosfera, como ozônio (a partir de NO_x e VOCs) e os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (PAH). Os NO_x , SO_x e VOCs sofrem reações químicas transformando-se em partículas finas ou reagem na superfície das partículas, agregando-se a elas.

WILSON,1978 afirma que os efeitos locais correspondentes às poluições atmosféricas, como emissões de compostos de enxofre, óxidos de nitrogênio e particulados, são “controláveis” através da aplicação da legislação ambiental, todavia os efeitos globais constituem preocupação pelo acúmulo de dióxido de carbono na atmosfera como resultado da queima dos combustíveis fósseis e a conseqüente retenção de calor decorrente do efeito estufa, e conseqüente aumento da temperatura de equilíbrio do planeta, enquanto CASTANHO,1999 destaca que os gases do efeito estufa (CO_2 , CH_4 , O_3 troposférico, N_2O e compostos halogênicos) por possuírem tempos de permanência na atmosfera, que variam de minutos a séculos, sejam motivo de discussões sobre as reais conseqüências e mecanismos de controle das emissões, assumindo terem importante papel nas alterações climáticas globais.

ROCHA,2003 considera que as ações decorrentes das atividades econômicas e industriais têm provocado alterações na biosfera, resultando na quase duplicação de concentração de Gases de Efeito Estufa (GEE) na atmosfera durante o período de 1750 a 1998, o que poderá desencadear um aumento na temperatura média do planeta entre 1,4 e 5,8 °C nos próximos cem anos, devido ao bloqueio à saída da radiação solar causado por esses gases, cujas emissões no Brasil vêm aumentando em conseqüência, dentre outros motivos, do uso dos diversos combustíveis fósseis. Assim, uma planta de geração termoeletrica convencional como a Usina Termoeletrica Piratininga, que requer a instalação de equipamentos complementares quando utilizando óleo combustível em seu processo, atesta e confirma a necessidade das ações efetivas para a substituição desse combustível, poluidor, por outro que ao menos represente menor dano ambiental.

Os custos dos processos de combate à poluição atmosférica em uma termoeletrica do porte da Usina Termoeletrica Piratininga, operando com óleo combustível, mesmo sem a pressão dos órgãos regulamentadores ambientais à época deste estudo, não conduziram à outras medidas que as de controle de combustão habitualmente desenvolvidas pelas equipes de operação e pelos químicos responsáveis pelo laboratório da Usina. O SO_2 , o principal gás poluente encontrado na Usina quando operando com óleo combustível dependerá, em quantidade, do regime de carga e do tipo de óleo utilizado. Exemplificando: no período em que a Usina operou na base do Sistema Elétrico Interligado, em carga total de 472 MWh, durante 24 horas por dia, consumindo de 3000 toneladas diárias de óleo combustível, fazer-se a opção entre queimar um óleo de baixo ponto de fluidez (BPF) e com teor de enxofre na ordem de 4%, ou um óleo de baixo teor de enxofre (BTE), com teor na ordem de 1%, desconsiderando-se os aspectos econômicos e financeiros envolvidos e variáveis de caráter gerencial, incorreria na decisão entre a emissão de 240 ou 60 toneladas diárias, respectivamente, de SO_2 diretamente ao meio ambiente (BARRETO NETO,1980). Na verdade outros fatores também deveriam ser levados em consideração tais como a topografia local, a proximidade com outras fontes poluidoras ou com centros urbanos, a probabilidade da ocorrência de inversões térmicas e a direção e a velocidade dos ventos, bem como aspectos técnicos passíveis de alteração como a altitude de lançamento e a velocidade dos gases na saída das chaminés ou a instalação de equipamentos para lavagem de gases (POLI et al.,1998;1999). Via de regra, na prática será a concentração de um ou mais agente poluente numa determinada região o que definirá o nível de poluição e a estimativa dos danos decorrentes, a partir do qual serão especificados os limites máximos tolerados de concentração dos diversos poluentes. A utilização de óleos com baixos teores de enxofre foi a opção assumida pela Usina, sendo adotada também em diversos países. CASTANHO,1999 ressalta que a Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB realiza desde 1973 o monitoramento da qualidade do ar na cidade de São Paulo, enquanto o Grupo de Estudos de Poluição do AR – GEPA realiza estudos desde 1976. A CETESB, na ocasião do Projeto Piloto do Etanol,

solicitava então às indústrias localizadas em áreas consideradas críticas a “colaboração” no sentido de procurar “diminuir a poluição do ar”, durante os meses de inverno, através da utilização de óleos do tipo BTE. O petróleo nacional, do tipo parafínico, contém menos de 1% de enxofre mas, por razões econômicas, a maior parte do óleo residual que era obtido a partir desse recurso era destinado à exportação, e somente através de acordos especiais de fornecimento, com sobre-taxa de 20%, era fornecido às indústrias pela Petrobrás; e as fontes naturais desse óleo de baixo teor de enxofre por sua vez eram poucas e insuficientes para a demanda na ocasião. BARRETO NETO, 1980 sobre a dessulfurização de óleos com alto teor de enxofre, cita um processo com cerca de 20 arranjos usando adsorção, absorção ou oxidação catalítica, ainda em fase experimental em algumas plantas nos Estados Unidos, Japão, Kuwait e na Venezuela, algumas sob protestos públicos, e de alto custo (da ordem de US\$ 60 por kW instalado) à época do Projeto Piloto do Etanol, e que consistia basicamente na eliminação da maior parte do SO₂ contido nos gases da combustão antes de serem encaminhados à chaminé, ressaltando que as quantidades envolvidas de SO₂ em uma termoeletrica como Piratininga demandariam instalações complexas e de elevado custo, além da geração de grande quantidade de material residual. HAMMOND et al., 1975 consideram o óleo combustível como sendo altamente versátil pois pode ser transformado em uma ampla variedade de combustíveis líquidos, com a remoção do enxofre e conversão de alguns de seus componentes em gás natural sintético ou mesmo hidrogênio. ALY, 2001 propõe a instalação de um processo de conversão dos gases de combustão na Usina Termoeletrica Piratininga, em 5 etapas, a saber: resfriamento dos gases de combustão na exaustão; irradiação por acelerador de elétrons; coleta e manuseio dos subprodutos; reaquecimento dos gases da combustão; e granulação do subproduto; salientando que o processo utiliza um feixe de elétrons para conversão de partes poluentes dos gases de combustão em matéria prima para fertilizantes, em do processo de tratamento simultâneo dos gases tóxicos (SO₂, NO_x), aplicável não só às instalações termoeletricas onde ocorram queima de carvão ou de óleo combustível, mas às

usinas petroquímicas, siderúrgicas e incineradores e em usinas de processamento de lixo, representando uma alternativa viável para minimizar a poluição ambiental.

A utilização de chaminés de elevada altura, cerca de 200 m, também seria uma opção para uma maior dispersão dos gases na atmosfera e assim evitar que as concentrações de poluentes ao nível do solo ficassem próximas aos limites máximos estabelecidos, não se considerando a princípio os custos de construção e manutenção e as interferências no espaço aeronáutico e os aspectos arquitetônicos de tal edificação. Todavia, os críticos ambientalistas questionam sobre a ocorrência de uma “transferência do problema”, ou seja, sobre aonde a massa dos gases que foram encaminhados à atmosfera, após serem transportados por longas distâncias, desceriam gradativamente ao nível do solo, causando problemas de poluição local em locais imprevisíveis. A maior restrição feita à utilização de chaminés de elevada altura é pela ocorrência de chuvas ácidas causadas pelos gases sulfurosos, embora ainda se discuta quanto às reais origens e dimensões de suas conseqüências; e este tem sido o melhor argumento para a instalação dos equipamentos de dessulfurização (BARRETO NETO, 1980).

A única maneira de se assegurar e garantir a não poluição atmosférica seria a proibição do lançamento dos produtos de combustão ao meio ambiente, o que é impraticável no atual estágio de desenvolvimento tecnológico da civilização. Parece ser racional o estabelecimento de limites ou cotas para emissões, evitando concentrações que causem prejuízos ou danos ambientais, pela redução ou garantia efetiva de uma melhor dispersão na atmosfera; e assim, a alternativa de usar-se óleos de baixos teores de enxofre foi conjugada à decisão por também restringir a operação da Usina Termoelétrica Piratininga aos atendimentos emergenciais do Sistema Elétrico Interligado, mantendo-se a instalação continuamente em regime de reserva fria e sob conservação, ou alternativamente, no regime de reserva quente, só podendo ser colocada em operação caso as condições atmosféricas ou os limites máximos de concentração de poluentes da região metropolitana de São Paulo não tivessem sido atingidos.

4 HISTÓRICO DA USINA PIRATININGA

A conformação geográfica do Brasil disponibiliza considerável número de bacias hidrográficas potencialmente adequáveis para implantação de projetos hidroelétricos, alguns de grande porte; e tal recurso vinha sendo relativamente bem explorado à época em que o “Modelo do Setor Elétrico” estava sendo diretamente gerido pela Eletrobrás. Os estudos para aproveitamento energético dos recursos hídricos, as ações legais e econômicas para implantação destes projetos e os prazos de engenharia para instalação física das novas plantas de geração, não raras vezes excedem aos desejáveis para o atendimento das necessidades de energia por parte da sociedade brasileira, e para tal o Sistema Elétrico complementa-se com energia obtida a partir de fontes energéticas de origem fóssil ou nuclear, assumindo seus custos econômico-financeiros e ambientais.

O desenvolvimento verificado na cidade de São Paulo após a última grande guerra mundial determinou um elevado incremento no consumo de energia elétrica que, aliado à severa estiagem ocorrida no triênio 52/54, evidenciou a conveniência pela complementação térmica ao conjunto paulista de geração hidroelétrica da Light, em particular e de forma emergencial (LIGHT,1980). Situada à margem norte do Canal Pinheiros Superior, na região urbana da cidade de São Paulo, a Usina Termoelétrica Piratininga (UTP) foi inaugurada em 1954, dispondo de 2 unidades de geração térmica a óleo combustível de 100 MWe, e portanto instalada em área próxima a um grande centro de carga e com facilidades para abastecimento via oleoduto da Petrobrás, contando na ocasião com ampla disponibilidade de água para resfriamento; assumindo rapidamente seu papel fundamental para a garantia de abastecimento contínuo da energia elétrica necessária para o processo de instalação do pólo industrial automobilístico na

região do ABC paulista. Sua capacidade foi quase que imediatamente (1960) elevada com a instalação e operação de mais 2 unidades de 136 MWe, com caldeiras operando, similarmente às duas anteriores, com óleo combustível. Durante o período de estiagem de 63/64 a UTP teve papel de relevância nacional pelo atendimento regional da demanda de energia, mantendo até o início dos anos 70 uma posição estratégica e fundamental junto ao Sistema Elétrico Interligado (LIGHT, 1980).

A construção de novas usinas hidroelétricas, algumas de grande porte, e os aumentos nos preços internacionais do petróleo, restringiu a operação das termoeletricas do país até meados de 1985, pois em função do 1º “choque” internacional dos preços do petróleo, em 1973, e posteriormente com a crise deflagrada a partir de 1979, a UTP (bem como as demais termoeletricas do país) passou a ser solicitada para operação somente em casos de emergência ou em atendimento à contingências do Sistema Elétrico Interligado, contribuindo para a manutenção do índice de confiabilidade (em termos de atendimento de cargas, controle de tensão e absorção de reativos), por ser uma “reserva de geração” pouco ou quase nada influenciável pelas adversidades hidrológicas. A Usina, em conjunto com a Usina Henry Borden (uma hidroelétrica instalada na região industrial de Cubatão, em São Paulo, e que utiliza água do Reservatório Billings, captada via bombeamento através do Sistema Tietê Superior-Canal Pinheiros, na área urbana da cidade de São Paulo), passaria a atuar como retaguarda em casos de contingências (black-out) no Sistema Elétrico Interligado, desde que mantida em regime operativo adequado à esta condição, nomeado como “regime mínimo-minimorum”, capaz de proceder ao atendimento das “cargas prioritárias” da cidade de São Paulo, ou seja, dos serviços essenciais da área central (hospitais, metrô, rede de trólebus, sinalização viária das artérias e principais corredores viários) e ao controle de enchentes nas regiões leste, norte e sudoeste da capital paulista, pois “auto-garantiria” o suprimento de energia bem como a necessária alimentação elétrica do sistema de captação de águas e de bombeamento para a Billings, também incumbido da drenagem emergencial urbana. Esta participação é de

importância social relevante, sendo imprescindível a manutenção da planta em condições de operação, permanecendo com uma unidade sincronizada ao Sistema Elétrico Interligado. Ao final da década de 90, questões econômicas e ambientais viabilizaram a conversão das caldeiras, nos moldes do que foi realizado por ocasião do Projeto Piloto do Etanol em 1980, para operação “bi-combustível”, com óleo combustível e gás natural; enquanto que, analogamente ao ocorrido no período 63/64, a Usina pode mais uma vez atender ao Sistema Elétrico durante o período da crise energética em 2001, retornando em seguida à sua condição na reserva, tendo sido ampliada em cerca de 400 MWe, em parceria com a Petrobrás, dentro do Programa Prioritário de Termoelétricas – PPT (ZANCHETA,2004).

A geração de energia elétrica a partir de um ciclo termodinâmico (ciclo de Rankine) incorre numa planta diferenciada, de maior complexidade que as de aproveitamento hidráulico pois, além de possuir todos os sistemas mecânicos e elétricos de uma hidroelétrica, contém sistemas específicos de controle e de proteção e uma quase total interdependência dos equipamentos do ciclo térmico, dentre os quais destacam-se a caldeira, o conjunto turbo-gerador, o condensador, diversas bombas e aquecedores de água e ar; e que implicam na necessidade de elevado padrão nas atividades de operação e de manutenção, em virtude de riscos pessoais e materiais decorrentes da complexidade dos processos. As unidades nºs 1 e 2 da Usina operam segundo um ciclo regenerativo e sem reaquecimento, enquanto que as unidades nºs 3 e 4 operam segundo um ciclo regenerativo com reaquecimento, ou seja, quando ocorre uma expansão parcial do vapor injetado na turbina, este volta à caldeira para ser reaquecido, retornando em seguida à turbina. A maioria dos equipamentos originais da Usina é de fabricação estrangeira, sem similares em tecnologia à época de sua instalação, e a sua operação consistia na atuação de cerca de 180 bombas, 76 tanques, 150 trocadores de calor, 500 motores elétricos, 4500 válvulas manuais e 240 válvulas de controle, além dos componentes básicos do ciclo termoelétrico citados e do acompanhamento de variáveis físicas diversas (LIGHT-STE,1980).

4.1 Descrição sucinta dos principais equipamentos de uma unidade da UTP

Na figura 1 estão representados os principais equipamentos de uma unidade termoeletrica convencional, que são a caldeira, o conjunto de turbina e gerador elétrico, o condensador e as bombas de água de alimentação; formando um ciclo termodinâmico. Na caldeira é injetado ar para que ocorra a queima do óleo combustível, sendo utilizada a água de um canal, rio ou lago, para resfriamento do vapor quando passa pelo condensador.

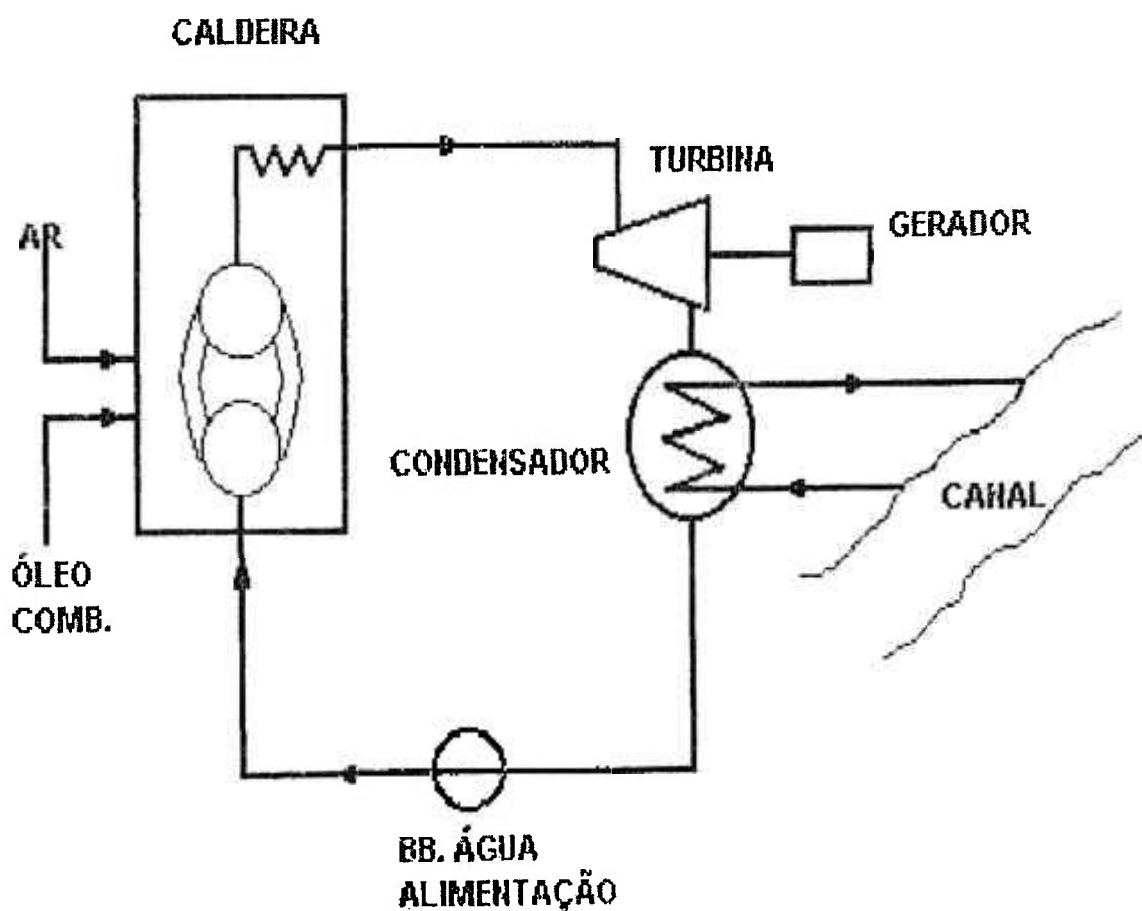


FIGURA 1 – Diagrama indicando os principais equipamentos de uma usina termoeletrica convencional a óleo (adaptado de apostila TD,1986)

Resumidamente, as unidades termoelétricas são constituídas por:

a) *Caldeira* - designação genérica do “gerador de vapor”, que é um trocador de calor que produz vapor aproveitando a energia de um combustível (carvão, óleo combustível, etanol, gás natural). Seus principais componentes e dispositivos auxiliares são:

- . queimadores – onde o combustível é pulverizado, atomizado ou injetado na fornalha, para o processo de combustão;
- . fornalha – onde ocorre o processo de combustão com o conseqüente aquecimento da água de alimentação, contida nos tubos que formam suas “paredes”, até que ocorra a vaporização;
- . tubulão de vapor ou tambor da caldeira – onde é recolhido o vapor saturado formado com o aquecimento da água contida nos tubos constituintes das paredes da fornalha;
- . superaquecedor – onde o vapor é aquecido acima da temperatura de saturação, para que possa ser enviado à turbina sob condições controladas de temperatura e pressão;
- . aquecedor de ar – onde o ar da combustão é aquecido aproveitando-se o calor dos gases da combustão;
- . reaquecedor – onde o vapor que retorna à caldeira, após sofrer uma expansão parcial na turbina, é “reaquecido”;
- . economizador – onde ocorre um pré-aquecimento da água de alimentação que chega à caldeira;
- . ventiladores forçados e induzidos – que suprem o ar necessário à combustão e executam a tiragem dos gases da fornalha para a chaminé, respectivamente;
- . chaminé – cuja função é direccionar os gases para as camadas superiores da atmosfera.

- b) *Turbogerador* – conjunto eletromecânico composto por uma turbina a vapor e pelo gerador elétrico acoplado. O vapor superaquecido e que é injetado na turbina através de um conjunto de válvulas de controle, passa por uma série de estágios de alta, média e de baixa pressão, compostos por pares de rodas dos quais uma é fixa, solidária à carcaça, e outra móvel, solidária ao eixo-rotor, transferindo energia mecânica. O gerador, acoplado à turbina pelo eixo-rotor, converterá a energia mecânica em energia elétrica, enquanto que o vapor, após passar pelo último estágio, já com baixa pressão e temperatura, será direcionado ao condensador. Nas unidades com reaquecimento o vapor, após passar pelos primeiros conjuntos de rodas, de alta pressão, é desviado de volta à caldeira onde ocorrerá um reaquecimento, sendo re-injetado nos estágios de média pressão da turbina. O controle da potência gerada ou o “controle de carga” é realizado pela variação da vazão do vapor admitido na turbina através das válvulas de controle. Assim, a potência máxima é obtida quando totalmente abertas e dependerá somente das condições de temperatura e pressão do vapor injetado na turbina e da pressão absoluta do vapor na saída da turbina, ou em condensação no interior do condensador; em outras palavras, dependerá da diferença de entalpia entre entrada e saída da turbina.
- c) *Condensador* – trocador de calor constituído por um feixe de tubos no qual circula água de resfriamento, e que recebe o vapor de baixa pressão da turbina, que após ser condensado, será re-injetado nos tubos da fornalha da caldeira. A pressão absoluta do vapor em condensação dependerá da temperatura da água de circulação ou de resfriamento, obtida de uma fonte fria que pode ser um rio, lago ou torre de resfriamento.

d) *Bombas de água* – o conjunto de bombas tem por finalidade aumentar a pressão da água destinada à caldeira, elevando-a até a pressão de vaporização na caldeira, através das bombas de água de alimentação da caldeira; e drenar o condensado, através das bombas de extração de condensado e eventualmente as bombas de recalque do condensado. Associados aos circuitos de condensado e de água de alimentação estão os *aquecedores de água*, comumente denominados como “pontos de aquecimento”, que realizam um aquecimento gradativo do condensado, podendo ainda ter a função de eliminar o oxigênio dissolvido neste condensado, bem como pré-aquecer a água de alimentação da caldeira; resultando em um rendimento maior para o ciclo. Estes podem ser de contato direto ou de mistura, onde ocorre a mistura de água e vapor; ou de superfície, de carcaça e serpentina, sem ocorrer o contato entre água e vapor.

As unidades geradoras nºs 1 e 2, de 100 MWe, foram instaladas em 1954 e podem ser caracterizadas por:

a) *caldeira* – a plena carga produz 386 t/h de vapor a uma temperatura de 496,1 °C e a uma pressão efetiva de 61,5 kgf/cm², queimando cerca de 27 t/h de óleo combustível;

b) *turbogerador* – a turbina apresenta 17 estágios, com 5 extrações de vapor para os aquecedores, com rotação de 1800 rpm. O vapor nas válvulas de controle é admitido a uma temperatura de 496,1 °C e pressão efetiva de 59,8 kgf/cm². O gerador possui 4 pólos, com capacidade máxima de 125000 kVA e tensão de 13800 V, sendo resfriado a hidrogênio;

c) *aquecedores* – cinco aquecedores de água de alimentação, sendo três de superfície e dois de contato direto.

As unidades geradoras nº s 3 e 4, de 136 MWe, foram instaladas em 1960 e podem ser caracterizadas por:

- a) *caldeira* – a plena carga produz 454 t/h de vapor a uma temperatura de 537,8 °C e a uma pressão efetiva de 133,6 kgf/cm², queimando cerca de 32 t/h de óleo combustível;
- b) *turbogerador* – a turbina apresenta 19 estágios, com 5 extrações de vapor para os aquecedores, com rotação de 3600 rpm. O vapor nas válvulas de controle é admitido a uma temperatura de 537,8 °C e pressão efetiva de 126,6 kgf/cm², enquanto que o vapor reaquecido é admitido a uma temperatura de 537,8 °C e pressão efetiva de 33,4 kgf/cm². O gerador possui 2 pólos, com capacidade máxima de 160000 KVA e tensão de 14400 V, sendo resfriado a hidrogênio;
- c) *aquecedores* – cinco aquecedores de água de alimentação, sendo quatro de superfície e dois de contato direto.

Uma característica, não só da Usina Térmica Piratininga mas das usinas termoeletricas mais antigas, é a de manter-se em seus procedimentos as unidades inglesas (empresas inglesas, canadenses ou norte-americanas, são fabricantes de peças e equipamentos ou responsáveis pelas montagens, comissionamentos, acompanhamento e suporte técnico), não tendo sido adotadas as unidades do Sistema Internacional pois envolveria mudanças físicas na instrumentação e “adequação” dos conjuntos de normas e procedimentos operativos. Dessa forma, os dados constantes dos diagramas, balanços térmicos e nos relatórios de operação da UTP apresentarão unidades inglesas ou métricas (por serem unidades importantes e amplamente empregadas, embora de uso restrito, o que facilita a troca de informações e dados entre instalações em todo o mundo – CIPM,1969); sendo a conversão para o Sistema Internacional feita gradativamente por ocasião das modernizações ou a instalação de novas unidades.

As tabelas 1A e 1B resumem os dados técnicos e características dos principais equipamentos da concepção original da unidade nº 4 da Usina Termoelétrica Piratininga, na qual foi realizado o Projeto Piloto do Etanol.

TABELA 1 A – Dados e características dos principais equipamentos da unidade nº 4 da UTP

Características dos equipamentos

Caldeira:	Fabricante	Babcock & Wilcox Co.	
	Tipo	radiante, 1 tambor	
	Ano de Fabricação / Instalação	1958 / 1960	
Produção nominal de vapor			
	1 000 000 lb	(453.590 kg/h)	
Pressão de projeto, no tubulão			
	2 225 psi	(156,4 kgf/cm ²)	
Pressão de trabalho, no tubulão			
	2 006 psi	(141,0 kgf/cm ²)	
Pressão de vapor principal			
	1 900 psi	(133,6 kgf/cm ²)	
Pressão de vapor reaquecido			
	475 psi	(33,7 kgf/cm ²)	
Temperatura do vapor principal			
	1 000 °F	(537,8 °C)	
Temperatura do vapor reaquecido			
	1 000 °F	(537,8 °C)	
Temperatura da água de alimentação.....			
	470 °F	(243,3 °C)	
Rendimento global de projeto		88,67 %	
Nº de queimadores (maçaricos).....		16	
Superfícies de troca de calor na Caldeira nº 4 da Usina Termoelétrica Piratininga:			
Fornalha			
	17 074 sqft	1 586,00 m ²	
Super-aquecedor			
	76 192 sqft	7 078,00 m ²	
Reaquecedor			
	21 900 sqft	2 034,60 m ²	
Economizador			
	14 300 sqft	1 329,00 m ²	
Aquecedor de ar			
	223 493 sqft	20 763,00 m ²	

TABELA 1 B – Dados e características dos principais equipamentos da unidade nº 4 da UTP

Características dos equipamentos

<u>Turbina:</u>	Fabricante	General Electric Co.	
	Tipo	condensação, com pontos de extração e reaquecimento	
	Ano de Instalação	1960	
	Potencia nominal (MWe)	125	
	Potencia Máx. Continua Garantida (MWe)...	136	
	Pressão de vapor principal	1 800 psi	(126,6 kgf/cm ²)
	Pressão de vapor reaquecido	475 psi	(33,4 kgf/cm ²)
	Temperatura do Vapor Principal	1 000 °F	(537,8 °C)
	Temperatura do Vapor Reaquecido	1 000 °F	(537,8 °C)
	Pressão na exaustão (absoluta)	2 "Hg	(0,069 kgf/cm ²)
	Rotação	3600 rpm	
	Nº de estágios	19	
	Nº de pontos de extração	5	
<u>Gerador:</u>	Fabricante	General Electric Co.	
	Tipo	A T B	
	Ano de Instalação	1960	
	Rotação	3600 rpm	
	Frequência	60 ciclos/seg	
	Nº de pólos	2	
	Tensão nos terminais.....	14 400 V	
	Tensão de excitação	375 V	
	Fator de potência	0,85	
	Classe de isolamento	B	
	Aumentos de temperatura máx.	148 °F	(limitada em 50 °C - estator)
		194 °F	(limitada em 76 °C - rotor)
	Nº de fases	3	

O resfriamento do gerador é realizado por hidrogênio em circulação forçada que, devido à sua capacidade de troca térmica, permite a montagem de um gerador com menores dimensões. A tabela 2 apresenta os valores de potência e corrente em função da pressão do H_2 .

TABELA 2 – Potência e corrente do gerador nº 4 em função da pressão de H_2

Pressão do Hidrogênio (kg/cm ²)		valores em função da pressão de hidrogênio (dados de placa)		
		0,035	1,05	2,10
Potencia aparente	(kVA)	128.000	147.058	160.000
Potencia real	(k W)	108.800	125.000	136.000
Corrente no estator	(A)	5. 132	5. 895	6. 415
Corrente de excitação	(A)	8 0 6	8 8 0	9 3 4

Fonte : LIGHT/UTP – Livro de Informações, dados e características – unidades 3 e 4

As perdas consideradas normais dessa unidade, com relação à energia liberada quando operando com óleo combustível, estão listadas na tabela 3. O rendimento de projeto em relação à energia fornecida é de 34,83 %.

TABELA 3 – Perdas percentuais nos diversos equipamentos da unidade nº 4

. na caldeira	11,10 %
. no turbo-gerador	0,54 %
. no condensador	48,47 %
. devido consumo de energia elétrica	1,74 %
. devido consumo de vapor auxiliar	1,74 %
. no pré-aquecimento de ar de combustão	1,58 %
perda total na unidade	65,17 %
Rendimento de projeto	34,83 %

Fonte : LIGHT/UTP – Usinas Termoeletricas: características gerais, 1980

As maiores perdas ocorrem no condensador, correspondendo à energia cedida pelo vapor à água de resfriamento. Na caldeira ocorrem perdas devido ao calor sensível dos gases liberados pela chaminé, bem como perdas ao meio ambiente por irradiação, convecção e condução, e do eventual combustível não queimado, enquanto que no conjunto turbina-gerador as perdas correspondem ao atrito nos mancais e elétricas no gerador. Os rendimentos da unidade ou da usina são normalmente determinados pela relação entre a energia elétrica gerada e enviada ao Sistema Elétrico e a energia liberada pelo combustível. Desta forma é possível o cálculo do rendimento médio para um determinado período, considerando-se variações de carga no gerador, ocorrência de paradas, o consumo de energia elétrica nos equipamentos auxiliares, mudanças no combustível e as influências devido a alterações nas grandezas operacionais. Exemplificando: uma elevação na temperatura do vapor na saída da exaustão da turbina incorre numa perda maior de energia para a água de resfriamento do condensador e conseqüentemente redução no rendimento do ciclo. Um aumento da ordem de 13°C em uma das unidades de 100 MWe causaria uma redução de 1,35 % no rendimento da unidade, correspondendo a um consumo adicional de aproximadamente 864 000 kg por mês de óleo combustível. Outro aspecto é a temperatura dos gases à saída da caldeira, pois o calor sensível dos gases de combustão é perdido para a atmosfera, e quanto menor for sua temperatura maior será o rendimento do ciclo. Todavia recomenda-se que a operação ocorra mantendo-se a temperatura dos metais dos tubos do aquecedor de ar ligeiramente acima do ponto de orvalho dos gases emanados, evitando-se uma condensação e a conseqüente formação de ácido sulfúrico e os graves resultados de uma corrosão nesses tubos. Através do pré-aquecimento de ar, para uma elevação de cerca de 28°C com relação à temperatura recomendada, constata-se uma queda da ordem de 1,3 % no rendimento da caldeira e de 0,52 % no rendimento do ciclo, o que para a unidade de 100 MWe incorrerá em um consumo adicional de 331 200 kg por mês de óleo combustível (LIGHT,1980).

Também devem ser continuamente monitorados fatores como a temperatura da água de alimentação da caldeira, as temperaturas e as pressões dos vapores superaquecido e reaquecido, ou consumos internos de vapor e de energia elétrica nos equipamentos auxiliares. Outros fatores relacionados ao controle de qualidade das águas e dos óleos em geral devem ser acompanhados pelos profissionais responsáveis por executar análises físicas e químicas, de competência do laboratório químico. Destaca-se aqui o rígido controle das condições físico-químicas dos diversos tipos de água utilizados na Usina, em especial no ciclo térmico, que deve estar isenta, ou conter quantidades limitadas, de impurezas tais como sais de cálcio, sílica ou ferro, capazes de provocar incrustações ou corrosão no interior dos tubos da caldeira, e que podem resultar até no rompimento desse tubo pois uma incrustação de apenas 0,1 mm de espessura pode causar um perigoso aumento de temperatura do metal. Assim, quanto maior for a pressão de trabalho maior deverá ser o grau de pureza da água em uma caldeira. Exemplificando, para uma vazão de água de alimentação da ordem de 400 000 kg por hora como as da Usina, com 0,1 ppm de carbonato de cálcio, ao final de um ano ter-se-ia acumulado 350 kg dessa impureza na caldeira, não se considerando todos os prováveis danos decorrentes. Por outro lado também o vapor produzido na caldeira deve ter alta pureza para não causar a formação de depósitos nos superaquecedores e um processo de corrosão, ou uma deposição de impurezas nas palhetas das rodas da turbina, que incorreria em perdas de eficiência e até erosão. Na UTP a água utilizada no ciclo é tratada e purificada por um processo de desmineralização através de resinas de troca catiônica e aniônica seguida por desaeração térmica, sendo também corrigido o pH para valores especificados pelo laboratório químico. O controle de qualidade é realizado com aparelhos de medição contínua de condutividade, pH e do oxigênio dissolvido.

Por fim ressalta-se a importância do controle do óleo combustível utilizado, das concentrações de impurezas como o enxofre, o sódio e o vanádio, que podem causar problemas na combustão, com danos na fornalha, superaquecedores e nos aquecedores de ar. Nestes últimos, em particular, destaca-se a ocorrência de corrosão dos tubos por ação do ácido sulfúrico, formado pela oxidação do enxofre a

anidrido sulfúrico (SO_3), em combinação com água. Admitindo-se uma caldeira em cuja fornalha fossem queimados 200 000 t de óleo combustível contendo 4% de teor de enxofre, tem-se 16 000 000 kg de anidrido sulfuroso (SO_2); e se apenas 1% desse fosse oxidado a anidrido sulfúrico (SO_3) ocorreria a formação de 196 000 kg de ácido sulfúrico, capaz de reagir após um ano, com cerca de 112 000 kg de ferro (BARRETO NETO, 1980).

O laboratório químico caracteriza o óleo combustível através da determinação do poder calorífico, pontos de fulgor e de fluidez, densidade, viscosidade a várias temperaturas e dos teores de enxofre, vanádio, sódio e cinzas, e recomenda o uso de aditivos ou especifica quais os tipos recomendados, capazes de atender às disposições da legislação ambiental. A tabela 4 apresenta as características dos óleos combustíveis segundo a Petrobrás, fornecedora da Usina.

TABELA 4 – Características dos óleos combustíveis utilizados na Usina T. Piratininga

Características	Óleo combustível tipo:	1 A	1 B
Densidade (kg/cm ³)		1,017	0,957
Ponto de fulgor (°C)		103	84
Ponto de fluidez (°C)		13	6
Enxofre (% em peso)		3,8	0,8
Cinzas (% em peso)		0,04	0,04
Poder Calorífico Superior (kcal/kg)		10.238	10.530
Teor de vanádio (ppm)		172	39
Sódio (ppm)		19	40
Níquel (ppm)		47	38
Viscosidade a 65°C (SSF)		178	180
Viscosidade a 100°C (SSF)		30	30

SSF – Segundo Saybolt Furol: orifício calibrado apresenta diâmetro de 3,5 mm (Furol deriva da expressão Fuel and Road Oils)

Fonte: UTP/ LQ-SVD (com dados fornecidos ao Laboratório Químico-SVD da Usina pela PETROBRAS)

Os cuidados com os equipamentos de uma usina termoelétrica não se restringem apenas àqueles observados por ocasião de sua operação, uma vez que estas usinas podem sofrer restrições motivadas pelos custos do óleo combustível ou pelas condições técnicas do Sistema Elétrico; e que no início da década de 80 resultaram na parada total de uma ou mais unidades geradoras da Usina, algumas vezes por grandes períodos, situação operativa denominada como regime de “reserva fria”, durante a qual adotaram-se procedimentos para conservação dos elementos mais sensíveis (componentes das caldeiras, linhas de vapor e instrumentação) pois podem sofrer sérios problemas de corrosão interna, devido às altas temperaturas que favorecem uma precipitação ou pelo menos uma concentração de impurezas e de produtos químicos sólidos, normalmente solúveis em temperaturas mais baixas. Exemplificando: uma das caldeiras da Usina, com cerca de 7500 m² de superfície interna de tubos e sofrendo um processo corrosivo correspondente a 220 g/m², após um ano de paralisação, e por não terem sido tomadas as medidas para parada e conservação, incorreria na corrosão de 1650 kg de metal e na presença de 2357 kg de Fe₂O₃ (óxido férrico), o que configuraria uma condição impeditiva pelos riscos de corrosão localizada e de possíveis rompimentos de tubos, caso retornasse à operação sem que antes passasse por um processo de limpeza química (BARRETO NETO, 1980). Este procedimento de limpeza química, além de ser bastante complexo e de demandar vários dias indisponibilizando a unidade geradora, remove em uma primeira etapa o cobre e seus óxidos, para em seguida remover os óxidos de ferro, incorrendo em desgastes adicionais às tubulações, sendo o motivo pelo qual procura-se manter as caldeiras e superaquecedores, os aquecedores e as tubulações de água de alimentação, conservados com solução de hidrazina e amônia (só mais recentemente as caldeiras e os superaquecedores passaram a ser mantidos continuamente secos e cheios com nitrogênio sob pressão). Situações conjunturais do Sistema Elétrico por vezes também exigiram que pelo menos uma das unidades geradoras adotasse o regime de “reserva quente”, sendo mantida aquecida e portanto em condições de rápida sincronização ao Sistema Elétrico (com previsão de entrada em serviço em até 24 horas, em função das características de uma máquina térmica).

4.2 Cuidados operacionais básicos e o desenvolvimento tecnológico

A transformação em energia mecânica ou elétrica a partir da energia química contida nos combustíveis é resultado do desenvolvimento de processos elaborados e de equipamentos específicos; e a transformação da energia térmica disponibilizada pelos combustíveis em energia mecânica, que é o processo fundamental de uma termoelétrica, é realizada por equipamentos específicos cuja construção estará baseada em conceitos teóricos que foram estabelecidos segundo ciclos termodinâmicos. Desta forma o processo de geração de energia elétrica em unidades termoelétricas envolve o rigoroso acompanhamento das condições operacionais, sendo exigidos cuidados extremos visando garantir-se a continuidade da operação segura e eficiente, em virtude principalmente das elevadas pressões e temperaturas do ciclo termodinâmico. Durante as manobras operacionais, notadamente por ocasião das variações de carga, nas partidas, paradas ou eventos com perda de disponibilidade, requerem-se cuidados especiais com relação às variações de pressão e de temperatura do vapor e da água de alimentação da caldeira, além da observação constante e apurada de todas as grandezas envolvidas. Os limites operacionais não devem ser ultrapassados, o que requer o conhecimento técnico pleno de cada manobra operativa e do funcionamento de cada elemento constituinte, notadamente em situações emergenciais, quando o operador deve atuar pronta e eficazmente e salvaguardar a unidade de avarias e perdas de continuidade operacional. Exemplificando: por ocorrerem dilatações térmicas no rotor da turbina, uma vez que este é submetido à altas temperaturas, exige-se rigoroso controle por parte da equipe de operadores de modo a evitarem-se interferências mecânicas com as partes fixas, o que pode danificar seriamente o equipamento, inclusive com graves riscos à segurança de toda a instalação e às equipes de trabalho.

O tempo necessário para a partida de uma unidade termoelétrica, desde o acendimento até o sincronismo ao Sistema Elétrico, é relativamente longo e dependerá basicamente das condições térmicas iniciais da turbina e da caldeira, uma vez que devem ser rigorosamente observadas as razões de elevação de pressão na caldeira ou de aquecimento dos metais da turbina; enfim, que não sejam ultrapassados limites operacionais ou executados procedimentos incorretos que causem danos ou diminuam a vida útil dos equipamentos da unidade de geração. A condição de partida de uma unidade de geração termoelétrica da UTP quando operando com óleo combustível, classificada como sendo uma “partida fria”, corresponde às situações nas quais a unidade permanece parada por 12 ou mais horas ou, nos casos em que a maior temperatura dos metais da turbina não seja superior a 280 °C; sendo os demais casos considerados como sendo de uma “partida quente”. O aspecto fundamental de uma partida será sempre o da preparação da caldeira, para que o vapor esteja nas condições ideais de temperatura, que permitam ser injetado na turbina sem o risco da ocorrência de choques térmicos elevados. Esta temperatura “de ajuste” será função de duas variáveis: da temperatura dos metais da turbina e da pressão de vapor que se deseja ter na caldeira, e dependente das condições térmicas da unidade, e essa elevação de temperatura, em função das condições iniciais da turbina e da caldeira, pode durar de uma a quatro horas. Quanto à preparação da turbina, só uma vez determinada a temperatura de ajuste e preparada a caldeira, é que se iniciam os procedimentos operacionais.

Outro aspecto a destacar-se é o de que unidades de geração termoelétrica apresentam limites inferiores para geração contínua de baixas cargas, estabelecidos em função de algumas condições operacionais da caldeira, turbina e do próprio ciclo térmico. Caso a unidade trabalhe por longo período abaixo desse limite poderá ocorrer: instabilidade da combustão na caldeira; diferenças de temperaturas entre as superfícies interna e externa das carcaças da turbina, acima

dos limites permissíveis para operação; diminuição do rendimento global do ciclo térmico; e erosão nos últimos estágios da turbina provocada por vapor úmido.

Quando se mantém em operação uma usina convencional, como a Usina Termoeletrica Piratininga, é indispensável assegurar-se um elevado rendimento em cada uma de suas unidades geradoras, diminuindo-se o consumo de óleo combustível por kWh gerado ou enviado e as perdas e danos por má operação. Este rendimento será função das características de projeto que normalmente não consideram operação em carga reduzida ou com equipamentos falhados ou defeituosos, paradas e partidas freqüentes, ou alterações nos parâmetros estabelecidos, com desconsideração dos limites operacionais, o que pode ser calculado a partir do correspondente "Diagrama de Balanço Térmico", fornecido pelo fabricante da unidade geradora.

Tecnologicamente os processos de geração termoeletrica estão sendo caracterizados pela instalação de novas e eficientes plantas, com turbinas a gás, sendo os principais agentes desta transformação, o desenvolvimento dos sistemas eletrônicos de controle, da metalurgia e de novos materiais. Os ciclos a vapor passaram a contar com turbinas a vapor que desempenham importante papel nesta revolução tecnológica, em ciclos térmicos com recuperação de calor, tais como os ciclos em co-geração e os ciclos combinados. Na geração de vapor em especial, encontra-se caldeiras de leito fluidizado e sistemas eficientes de tratamento de efluentes que estão reduzindo as restrições ambientais à utilização de combustíveis como o carvão e os óleos pesados, revitalizando a aplicação das turbinas a vapor em Ciclos Rankine, enquanto que as tecnologias de gaseificação proporcionam a aplicação destes combustíveis em turbinas a gás, bem como a biomassa de diversas origens, respeitadas as condições de adaptabilidade de cada combustível à máquina motriz. O desenvolvimento de modernas e avançadas tecnologias estacionárias de geração como os ciclos a gás e a vapor e a sua integração em sistemas de co-geração e ciclo combinado, integra a proposta para a utilização de combustíveis "limpos". As turbinas a gás têm um papel preponderante no ciclo

combinado e se destacam pela sua natureza de concepção, seja industrial ou aeroderivativa, e pelas sofisticações nestes ciclos a gás, que lhes conferem maior eficiência ou potência. Uma central termoelétrica constituída por dois ou mais ciclos termodinâmicos em uma mesma planta, cuja finalidade exclusiva será a produção de energia elétrica, comporá um ciclo combinado. Diferentes processos e máquinas térmicas podem ser combinados, trabalhando com meios fluidos distintos ou não, e ciclos empregando as mais diferentes substâncias. Um tipo de ciclo combinado que tem encontrado ampla aplicação caracteriza-se pela utilização de turbinas a gás (ciclo Brayton) juntamente com turbinas a vapor (ciclo Rankine), no qual a energia térmica contida nos gases quentes exaustos pela turbina a gás é utilizada em uma caldeira de recuperação para a produção de vapor, vapor este que é então utilizado como fluido de acionamento em uma turbina a vapor para geração de trabalho adicional. Nesta concepção a turbina a vapor deverá ser de condensação e o vapor expandido até os limites mínimos de vácuo normais em ciclos a vapor, após passar pelas rodas da turbina, é encaminhado ao condensador para então retornar, em ciclo fechado, à caldeira.

A atual tecnologia busca também opções “mais limpas” quanto aos combustíveis utilizados nas novas plantas de geração termoelétrica, optando por combustíveis menos poluentes como o gás natural, ou instalando sofisticados sistemas de controle e remoção de poluentes (POLI et al., 1995) como o proposto para a Usina Termoelétrica Piratininga, quando operando com óleo combustível, em função da emissão de óxidos sulfurosos bem como óxidos de nitrogênio, formados quando ocorre a combustão do nitrogênio a alta temperatura, e que são duas vezes mais tóxicos que os de enxofre (ALY, 2001), responsáveis por inúmeros problemas operacionais e pelo impacto ambiental devido às emissões ambientais. O etanol, por não conter tais elementos em sua composição coloca-se como uma opção de combustível “limpo e renovável” e sem incorrer na necessidade de dispositivos adicionais para controle e eliminação das emissões decorrentes da utilização de combustíveis de origem fóssil.

5 QUADRO ENERGÉTICO E PESQUISAS DE COMBUSTÍVEIS ALTERNATIVOS

WILSON, 1978 afirma em trabalho de pesquisa patrocinado pelo MIT - Massachusetts Institute of Technology, após dois anos de estudos que fora a energia hidroelétrica, os recursos renováveis de energia (energia solar, dos ventos e das marés) não contribuiriam significativamente até o final do século XX para o suprimento global de energia, embora pudessem vir a serem importantes em certas regiões, e que sua importância deveria aumentar gradualmente ao longo do século XXI. Ressalta que quanto mais tempo o mundo levasse para encarar o problema energético, mais sérias seriam as consequências, tornando o tempo um dos mais preciosos recursos para a solução dos problemas de demanda, escassez e conservação do petróleo, gás, carvão, energia nuclear e outros combustíveis. HAMMOND et al., 1978 propõe que cada país desenvolva tecnologias próprias para exploração de novas fontes de energia ou para melhorar o uso das fontes existentes, atentando para o "balanceamento" entre as necessidades de energia e o atendimento aos padrões de proteção ambiental, instigando-se a eliminação dos desperdícios de energia causados por tecnologias ineficientes ou práticas descuidadas, e tomando em consideração as preocupações quanto a segurança nacional, decorrentes das importações de petróleo e gás natural e das oscilações nos preços; que por sua vez sugerem incentivos à pesquisa e desenvolvimento. VIEIRA et al., 1978 consideram que no Brasil, embora estivesse longe de ter assimilado os impactos da crise energética mundial, o problema energético decorrente do choque nos preços do petróleo assumia tamanha amplitude e gravidade que não podia ser resolvido sem uma verdadeira mobilização nacional; e ressalta que a posição do governo brasileiro quanto à pesquisa e desenvolvimento possibilita listar-se mais de uma centena de projetos relacionados com o

aproveitamento de novas fontes, uso racional e substituição de energia, pois não foram poucos os que perceberam a gravidade do problema e puseram sua imaginação a serviço da busca de formas substitutivas para o petróleo importado. WILSON,1978 reconhece haver uma relação entre as políticas energéticas, objetivos ecológicos e a necessidade de se considerarem as alternativas energéticas e seus custos à luz dos padrões de qualidade ambiental. A deterioração ambiental provocada pela produção e utilização de energia pode resultar em efeitos locais, controláveis com a adoção de tecnologia apropriada cujos custos podem ser incluídos no preço final do produto ou serviço; bem como em efeitos regionais ou globais, difíceis e mesmo impossíveis de serem controlados. Este quadro continua bastante atual, a considerar-se o PPA, do Ministério das Minas e Energia, demonstrando que o país sempre foi palco de pesquisas e experimentações, todavia ressentindo-se de um competente registro deste conhecimento tecnológico, e portanto sem memória técnica de suas realizações.

No tocante ao álcool etílico VIEIRA et al.,1978 ressaltam que o IPT, com o objetivo de substituir o petróleo como fonte de matéria prima estudava a fabricação de derivados primários do álcool etílico enfocando inicialmente sua desidratação catalítica para produção industrial de etileno. A 1ª etapa consistia em estudos em micro-escala utilizando-se reatores catalíticos especiais com o objetivo de se conhecer a cinética da reação, desenvolver catalizadores e determinar as condições ótimas de operação, enquanto a 2ª etapa, em escala semi-piloto, objetivava a obtenção de dados que permitissem uma avaliação técnico-econômica do processo, bem como sua ampliação à uma escala industrial e ao mesmo tempo permitir a avaliação do catalizador desenvolvido com vistas a sua utilização em plantas comerciais. ARBEX,2001 salienta que o emprego do álcool em substituição parcial ou total aos derivados de petróleo remonta à época da Primeira Guerra Mundial (1914-1918); sendo lançado em escala comercial o “USGA”, em 1927, que era produzido pela Usina Serra Grande de Alagoas, composto por 80% de etanol e 20% de éter. Os baixos preços do petróleo desestimularam essa e outras iniciativas similares de consolidar no país a utilização do álcool como combustível

em larga escala. Na década de 30 utilizou-se uma mistura de 5% e durante a Segunda Guerra Mundial , misturas de 20% de etanol na gasolina, e salienta que o Brasil é o único produtor mundial que realiza duas colheitas anuais de cana-de-açúcar, de dezembro à maio no norte-nordeste e de abril à novembro no centro-sul. ARAUJO e RODRIGUES,1984 sobre os limites ao papel do álcool na política energética nacional, comentam que o Programa Nacional do Álcool – PROALCOOL representou o maior esforço já realizado para o desenvolvimento de fontes alternativas de energia.

6 HISTÓRICO DO PROJETO PILOTO DO ETANOL

Em meados de 1979, a Eletrobrás, em atendimento às determinações do Ministério das Minas e Energia e na condição de empresa coordenadora do Setor Elétrico Brasileiro, consultou suas controladas quando ao desenvolvimento de estudos sobre racionalização do uso de energia. Em resposta quase que imediata, a Light, na época uma de suas controladas, firmou disposição para formalizar um programa que vinha sendo desenvolvido em uma de suas gerências para “pesquisa de alternativas para a queima de óleo combustível” utilizado em uma planta geradora situada em São Paulo, e que já vinha ocorrendo desde o início daquele ano.

Tal proposta foi “encampada” pela Eletrobrás e pelo Ministério das Minas e Energia, de forma que a Light, pelo aviso geral da presidência P-51, em 21.06.79, estabeleceu um programa interno para “exame da viabilidade da utilização de álcool etílico ou outros combustíveis, em substituição parcial ou total aos derivados de petróleo consumidos na Usina Termoelétrica Piratininga”, na cidade de São Paulo. Como diretrizes gerais destacavam-se:

- a) estudar as adaptações necessárias na Usina Termoelétrica Piratininga e nos sistemas de armazenamento e transporte de combustível, para a utilização de álcool etílico ou outros substitutos do óleo Bunker C;
- b) realizar, se este for o caso, experiências de operação em unidades da Usina, utilizando álcool etílico ou outros combustíveis em complementação ou substituição ao óleo Bunker C;

c) analisar as possibilidades de fornecimento, pela indústria, dos equipamentos necessários à adaptação, elaborando projetos e construindo equipamentos, se for o caso;

d) avaliar as disponibilidades de fornecimento, presentes e futuras, de combustível alternativo, seu custo e demais fatores de viabilização do projeto e examinar os efeitos da substituição de combustível, sobre a vida útil da Usina e sobre o meio ambiente.

O documento assinado pelo Dr. Luiz Oswaldo Norris Aranha, na condição de presidente da Light - Serviços de Eletricidade S.A., ainda ressaltava que “na realização de tarefas que lhe são atribuídas, poderá realizar entendimentos diretos com instituições de pesquisa, indústrias e fabricantes no País e no exterior” e impunha o prazo para conclusão em até 31 de janeiro de 1980.

Por representar um anseio e ser uma proposição que partira da própria Usina, esta decisão empresarial acabou por tornar-se um incentivo, pelo desafio da pesquisa, para todo o quadro de funcionários lotados na Usina Termoeletrica Piratininga, independentemente da responsabilidade técnica nominalmente atribuída, uma vez que deu indistintamente a todos, independentemente de qual fosse seu nível de especialização tecnológica, a oportunidade de efetivamente colaborar a consecução deste propósito.

A proposta tecnológica para desenvolvimento deste projeto, segundo diretrizes da Eletrobrás / Light consistia em:

a) que o combustível alternativo escolhido (álcool etílico hidratado a 94%) fosse considerado como “uma alternativa ao óleo combustível” e como “seu substituto final em situações de força maior”; e assim, que o etanol pudesse vir a ser utilizado, conjuntamente ou em substituição total ao

óleo combustível “C”, sem a realização de mudanças estruturais significativas na caldeira ou sistemas supervisórios e de controle da unidade que viesse a ser adaptada;

b) que o “sistema alternativo” a ser proposto tivesse “alta modularidade”, favorecendo um futuro desenvolvimento de componentes e tecnologia nacional, devendo manter os índices de confiabilidade atingidos, na caldeira e na unidade geradora, assegurando-se a integridade de todos os sistemas originalmente instalados;

c) que o projeto permitisse a ampla participação das equipes internas, de operação, manutenção e técnicas de apoio (laboratório químico e verificação de desempenho), através da formulação de propostas de soluções simples e de baixo custo, específicas para cada etapa ou “módulo” do projeto, como forma de motivação e de incentivo ao comprometimento;

d) que o “índice de substituição” da capacidade de geração fosse superior à média histórica da geração no período considerado como de transição entre os regimes de atendimento da base e o de atendimento da ponta, ou seja, que fosse possível atingir-se uma capacidade de geração de 70% da capacidade máxima da unidade a ser adaptada;

e) que na medida do possível fossem “reciclados” equipamentos e todos materiais necessários à adaptação, desde que disponibilizados dentro da empresa, minimizando-se custos; procurando manter a “cultura interna” de alta suficiência com os mínimos custos de implantação, sempre com soluções práticas e objetivas, e que servissem como orientação para futuros desenvolvimentos de componentes, dentro do mercado nacional.

7 ETAPAS DO PROJETO

O Projeto Piloto do Etanol, cuja realização ocorreu entre os meses de junho de 1979 e janeiro de 1980, pode ser sintetizado para efeito de melhor compreensão em quatro etapas de desenvolvimento; possibilitando ao autor, através da reciclagem de materiais e uso de componentes em estoque, e contando com o apoio dos recursos técnicos internos da Usina Termoelétrica Piratininga, realizar a experimentação prática da combustão do álcool etílico utilizando uma caldeira de grande porte como plataforma de testes, sem envolver a contratação de empresas especializadas de consultoria em engenharia ou de instituições ou centros de pesquisa ligados a importantes universidades, fato que por si só o diferencia da maioria dos projetos na indústria e o aproxima da linha de pesquisa acadêmica.

7.1 Etapa de levantamento de dados sobre combustíveis

Estudados os aspectos termodinâmicos e tecnológicos de vários combustíveis “alternativos”, relacionados com sua possível utilização em substituição ao óleo combustível nas caldeiras da Usina Termoelétrica Piratininga – UTP, foram selecionados o etanol, o metanol, o carvão mineral, o gás de carvão mineral e o carvão vegetal, sendo avaliados quanto aos seguintes aspectos:

- a) capacidade máxima de troca de calor para produção de vapor, a fim de estimar possíveis reduções na potência da Usina;
- b) principais modificações necessárias nos equipamentos da usina para utilização de cada combustível, bem como os custos envolvidos e dos problemas decorrentes de sua queima, especialmente os ambientais;

c) fontes de suprimento desses combustíveis.

Os estudos termodinâmicos revelaram a possibilidade de queima do etanol e do gás de carvão mineral instalando-se queimadores apropriados e sem necessidade de alterações na estrutura da caldeira. Os investimentos para a adaptação da unidade seriam de pequena monta em relação ao custo de construção de nova usina na ocasião, e referem-se principalmente à instalação dos sistemas de armazenamento e para condução do combustível até os queimadores (linhas de alimentação) e às adaptações para atualização tecnológica dos sistemas de controle e proteção da caldeira. Da mesma forma também seria possível sob o aspecto de capacidade de troca de calor, a queima do carvão vegetal, havendo apenas uma redução na capacidade de geração da Usina e, devido às características desse combustível, seriam necessárias modificações estruturais no que se refere à instalação de sistemas de recebimento e manuseio de carvão (descarregamento de vagões ferroviários, pátio de armazenamento, correias transportadoras, etc) e sistemas de alimentação, pulverização e queima (silos, alimentadores de carvão, pulverizadores, ventiladores de ar primário, queimadores, etc), com investimentos consideráveis para a adaptação. Quanto ao aspecto ambiental deve-se considerar a emissão de poeiras fugitivas devido às atividades de manuseio e estocagem. O carvão mineral, a exemplo do carvão vegetal, apresentaria resultados satisfatórios no tocante a capacidade de troca de calor, contudo seriam necessárias profundas alterações na Usina, envolvendo além da instalação dos sistemas de recebimento e manuseio do carvão, e de alimentação, pulverização e queima similares aos para o carvão vegetal, também os sistemas de coleta de cinzas (precipitadores ciclônicos e eletrostáticos) e de descarte das cinzas, o que oneraria sensivelmente os investimentos necessários à essa adaptação. No tocante à poluição, apresentaria como inconveniente a emissão de poeiras fugitivas e a emissão de partículas sólidas nos gases de combustão, bem como os problemas associados ao descarte das cinzas.

O metanol por sua vez possui baixa temperatura de chama, provocando desequilíbrio nas trocas de calor no interior da caldeira, não permitindo que o vapor produzido atinja as condições de pressão e de temperatura exigidas na turbina, limitando a capacidade de geração da Usina. As modificações para armazenamento e transporte desse combustível são equivalentes às citadas para o etanol, contudo, por apresentar alto grau de toxicidade, requer cuidados especiais na manipulação. Na tabela 5 estão agrupados os resultados da análise dos cinco combustíveis avaliados. Outros combustíveis alternativos, como o gás metano e os óleos vegetais, não foram avaliados em virtude de não haver perspectivas de produção em escala industrial na ocasião do projeto.

TABELA 5 – Resultado da análise termodinâmica e tecnológica

<u>Combustível</u>	Quanto à redução da capacidade de geração elétrica	Quanto às principais modificações ou adaptações necessárias	Quanto aos custos ^(*) para modificações e adaptações	Quanto aos aspectos ambientais
Etanol	mínima	Sistema de armazenamento e de movimentação de combustível; queimadores e sistema de proteção da caldeira.	1 %	Sem inconvenientes
Gás de carvão mineral	mínima	Sistema de armazenamento e de movimentação de combustível; queimadores e sistema de proteção da caldeira.	5 %	Sem inconvenientes
Carvão vegetal	pequena	Sistema de recepção e manipulação de carvão, pulverização e queimadores.	15 %	Emissão de poeiras
Carvão mineral	pequena	Sistema de recepção e manipulação de carvão, pulverização e queimadores, sistema de coleta e descarte de cinzas.	35 %	Emissão de poeiras e particulados nos gases
Metanol	razoável	Sistema de armazenamento e de movimentação de combustível; queimadores e sistema de proteção da caldeira	1 %	Sem inconvenientes salvo cuidados no manuseio

(*)% em relação ao custo para construção de nova usina hidroelétrica de 110 MWe, nos valores correntes estimados em 1979

Fonte : LIGHT/UTP (com base em dados levantados pelo PPE)

O etanol acabou sendo escolhido por ser o único disponível com facilidades e por permitir que fossem realizadas as adaptações necessárias na planta em curto prazo e sem perder a disponibilidade para geração com óleo combustível. Na ocasião procurou-se obter informações sobre a pesquisa realizada pela COMGAS, empresa distribuidora de “gás de rua” em São Paulo, pois por ocasião do 1º Congresso Brasileiro de Energia, realizado no Rio de Janeiro em 1978, ressaltou-se que fora estabelecido em 1975, um programa de pesquisa com intuito de verificar a possibilidade prática da gaseificação do álcool etílico, sendo construída uma planta piloto capaz de operar com pressões de 30 atmosferas, com misturas de álcool etílico e água em proporções variadas, alimentadas no reator, obtendo-se misturas gasosas compostas de CO, CO₂, CH₄, H₂ e H₂O. Embora a COMGÁS concluísse pela viabilidade técnica de que o etanol poderia ser gaseificado como matéria prima alternativa à nafta, simplificando o esquema do processo de suas unidades de CRG (Catalytic Rich Gás) à alta pressão, obtendo misturas ricas em CH₄ para o gás de rua e o GNS-Gás Natural Sintético e uma alternativa para a obtenção de produtos químicos básicos como amônia (fertilizantes hidrogenados), metanol e hidrogênio, não se obteve novos dados sobre a pesquisa por não ser o processo economicamente competitivo sem um subsídio da ordem de 25% no preço do etanol, mas que traria uma contribuição marcante para atenuar-se o problema energético.

Outro combustível considerado foi o “gás de rua” fornecido pela COMGÁS, obtido a partir da nafta originada do petróleo e recebida, por via férrea ou rodoviária, da refinaria de Paulínia, SP, sendo armazenada e conduzida à vaporizadores e hidrogenadores para a retirada de compostos sulfurados (reduzidos à gás sulfídrico à 35°C), permanecendo apenas 0,1ppm de enxofre. Transformações catalíticas na presença de níquel, e sob temperaturas mais elevadas verifica-se reação de metano com vapor de água, dando origem ao hidrogênio, CO e CO₂, com abaixamento do poder calorífico de 6000 para 4750 kcal/m³ para atender

especificações químicas para o consumo. Nova reação catalítica à base de óxidos de ferro destina-se a baixar o teor de CO pela toxicidade, após o que se adiciona o produto odorizante, resultando na composição com 43,2% de H₂, 32,8% de metano, 2,5% de CO, 20,0% de CO₂ e 0,6% de naftaleno (GOLDEMBERG et al.,1976). Todavia a empresa não se manifestou quanto à possibilidade de fornecimento para testes, motivo pelo qual foi desconsiderada a alternativa.

O laboratório químico e o setor de verificação de desempenho da Usina Termoelétrica Piratininga utilizaram a tabela 6, de eficiência média de queima, nas avaliações e nos cálculos preliminares sobre os diversos combustíveis para compor o material de divulgação do projeto em apresentação à imprensa sobre os motivos e os objetivos da realização.

TABELA 6 – Eficiência média de queima

Combustível	Caldeira	Fornos
Lenha	0,50	0,40
Carvão	0,60	0,50
Óleo combustível	0,75 a 0,90	0,60 a 0,70
G L P	0,75 a 0,85	0,55 a 0,65
Óleo diesel	0,75 a 0,90	0,60 a 0,70
Querosene	0,75 a 0,90	0,60 a 0,70

Fonte : LIGHT/UTP (com base em dados levantados pelo PPE)

Foram efetuados diversos levantamentos sobre combustíveis que resultaram na confecção da tabela 7, de equivalência dos combustíveis baseada no poder calorífico inferior, e que foi utilizada referência pelo laboratório químico da

UTP durante o Projeto Piloto do Etanol, ressaltando-se que nas aplicações práticas, os aproveitamentos poderão ser diferentes pois dependerão das condições tecnológicas das instalações e dos equipamentos para combustão.

TABELA 7 – Equivalência dos Combustíveis pelo Poder Calorífico Inferior (PCI)

Equivalência dos Combustíveis (pelo PCI)								
	PCI	Lenha (m³)	Carvão vegetal (kg)	Óleo comb. (kg)	Óleo diesel (l)	Quero- sene (l)	GLP (kg)	em kWh
Lenha (m³)	920.000 a 1.320.000 kcal/m³	*	120 a 290	95 a 135	107 a 153	111 a 159	85 a 122	1070 a 1535
Carvão Vegetal (kg)	4.600 a 7.700 kcal/kg	0,0035 a 0,0084	*	0,47 a 0,78	0,53 a 0,89	0,55 a 0,93	0,42 a 0,71	5,35 a 8,95
Óleo combustível(kg)	9.770 kcal/kg	0,0074 a 0,0106	1,27 a 2,12	*	1,13	1,17	0,90	11,36
Óleo diesel (l)	8.620 kcal/l	0,0065 a 0,0094	1,12 a 1,87	0,88	*	1,04	0,80	10,02
Querosene (l)	8.300 kcal/l	0,0063 a 0,0090	1,08 a 1,80	0,85	0,96	*	0,77	9,65
GLP 50% (kg)	10.800 kcal/kg	0,0082 a 0,0117	1,40 a 2,35	1,106	1,25	1,30	*	12,56
em Quilowatt -hora	860 kcal	0,0006 a 0,0009	0,112 a 0,187	0,088	0,100	0,104	0,08	*

Fonte : LIGHT/UTP (com base em dados levantados pelo PPE)

A tabela 8 contém informações sobre análises típicas e era utilizada pelo laboratório químico e pelo setor de verificação de desempenho da UTP nos cálculos de consumo e eficiência das unidades geradoras, para as avaliações tecnológicas dos recebimentos de óleo combustível, fornecido da Petrobrás, e para verificação e conferência dos cálculos financeiros dos respectivos faturamentos.

TABELA 8 – Análises típicas dos óleos (de acordo com a classificação adotada em 79/80)

Análises típicas	Classificação do tipo de óleo combustível						
	querosene	diesel	OC-4	B P F baixo ponto de fluidez	B T E baixo teor	B T E * de enxofre	A P F alto ponto de fluidez
- densidade 20 / 4°C (kg/cm³)	0,785	0,825	0,865	0,970	0,940	0,910	0,925
- ponto de fulgor (°C)	55	74	85	130	130	160	140
- viscosidade CIN 20°C, (cS)	2,2	-	-	-	-	-	-
- viscosidade SSU 100°F	-	39	45	10000	7500	5600	5000
- viscosidade SSF 122°F	-	-	-	390	330	220	180
- ponto de névoa (°C)	-	2	-	-	-	-	-
- ponto de fluidez (°C)	-	-	2	10	5	48	35
- índice diesel	-	62	-	-	-	-	-
- enxofre % peso	0,03	0,70	1,4	4,6	0,95	0,15	2,8
- poder calorífico superior (kcal/kg)	11100	10950	10840	10350	10515	10650	10525
- poder calorífico inferior(kcal/kg)	10380	10260	10180	9770	9800	9950	9810

SSU – Segundo Saybolt Universal - orifício universal, com diâmetro de 1,7 mm

SSF – Segundo Saybolt Furol - orifício furol, com diâmetro de 3,5 mm

cS – centiStoke (do Sistema CGS) onde Stoke é a unidade de viscosidade cinemática γ (cm²/s)

7.2 Etapa de levantamento de dados técnicos sobre equipamentos, definição do ante-projeto e ensaios individualizados de dispositivos

Esta etapa corresponde ao período no qual foram efetuados levantamentos dos sistemas existentes para óleo combustível, propostas adaptações em diversos dispositivos para o uso do etanol, realizados ensaios em bancada dos discos fracionadores (de atomização) e testes em componentes, além da definição do arranjo físico final da instalação, dos quais destacam-se:

a) levantamento físico detalhado dos maçaricos da Usina e primeiros contatos com o fabricante das caldeiras (Babcock & Wilcox Co.) para consulta e investigações sobre as modificações necessárias para a queima de álcool etílico. A empresa informou não possuir experiência na queima do etanol, apenas do metanol, fornecendo os dados técnicos de projeto e dois discos fracionadores (atomizadores). Por julgar que o comportamento do etanol poderia ser “similar” ao do vapor de água e que a queima ocorreria simultaneamente à do óleo combustível, através da utilização de um maçarico de baixa pressão de óleo combustível adaptado para o etanol, os discos fornecidos apresentavam uma geometria similar à dos discos de óleo, totalmente diferente daquela que acabaria por ser desenvolvida e utilizada ao final deste estudo. A figura 2 representa um corte num maçarico de baixa pressão e o detalhe da geometria do disco fracionador, similar aos que foram recebidos e ensaiados no início desta etapa.

b) construção das bases de concreto e instalação dos tanques de armazenamento de etanol (início da construção do dique). A figura 3 mostra um momento dessas atividades.

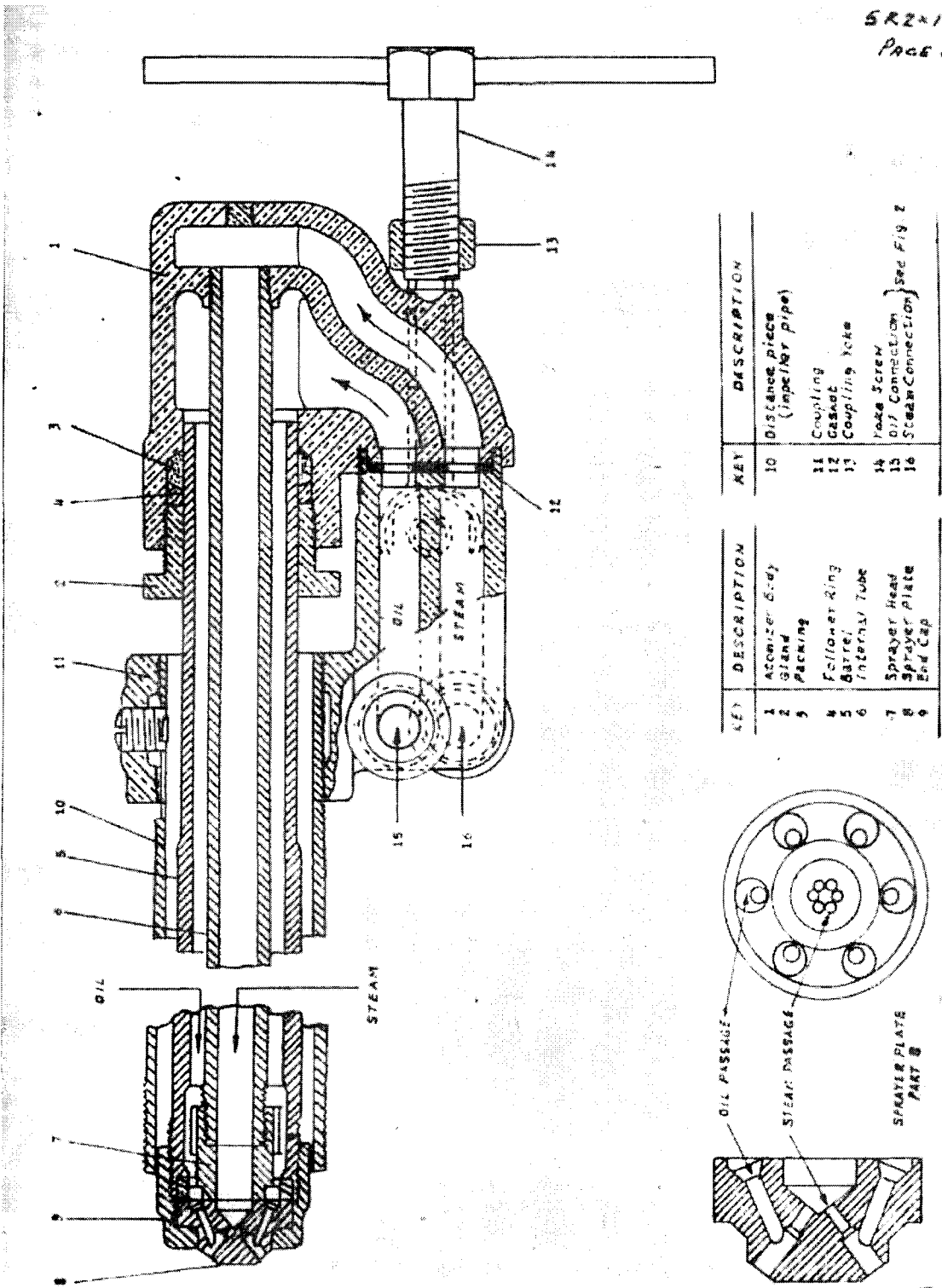


FIGURA 2 - maçarico de baixa pressão e detalhe do disco fracionador (óleo)

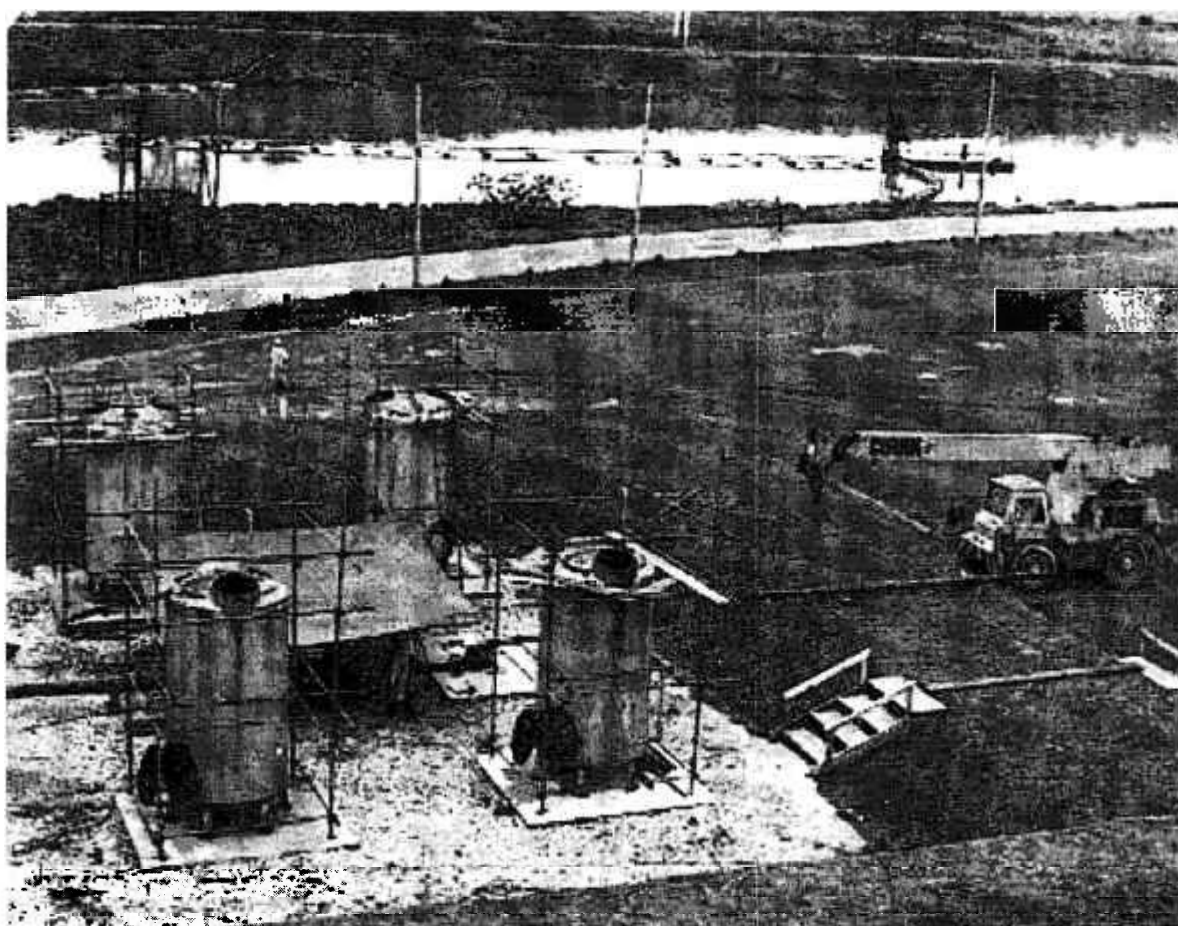


FIGURA 3 - instalação dos tanques para armazenagem de álcool etílico do PPE

c) modificações no tubo-guia dos maçaricos visando estudos do resfriamento;

d) projeto e construção de bancada para ensaios de atomização, ao ar livre, para ensaios em um dos maçaricos das caldeiras 3 e 4, utilizando-se água. Na figura 4 é apresentado o diagrama da bancada de testes e na figura 5 uma visão do conjunto preparado para os ensaios.

e) testes dos discos atomizadores recebidos da Babcock & Wilcox Co., e início dos hidrodinâmicos para projeto de conjunto de discos de referência;

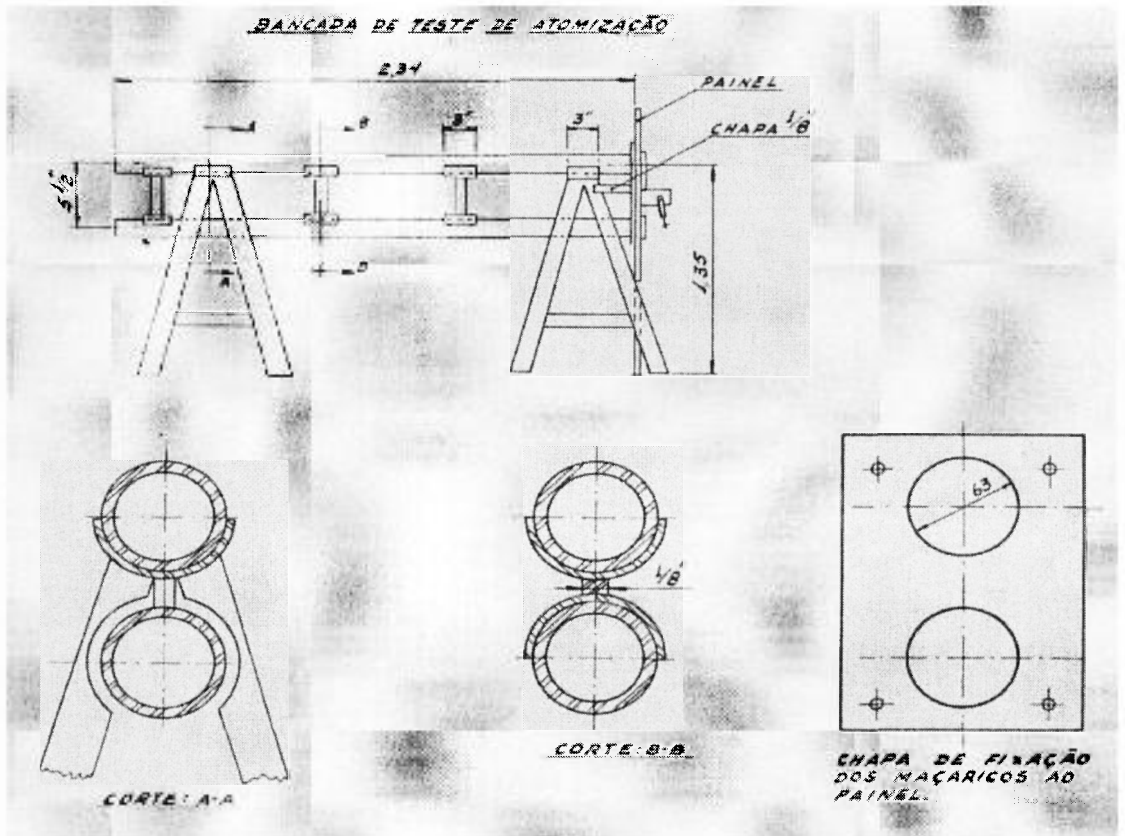


FIGURA 4 - diagrama da bancada de testes de atomização do etanol

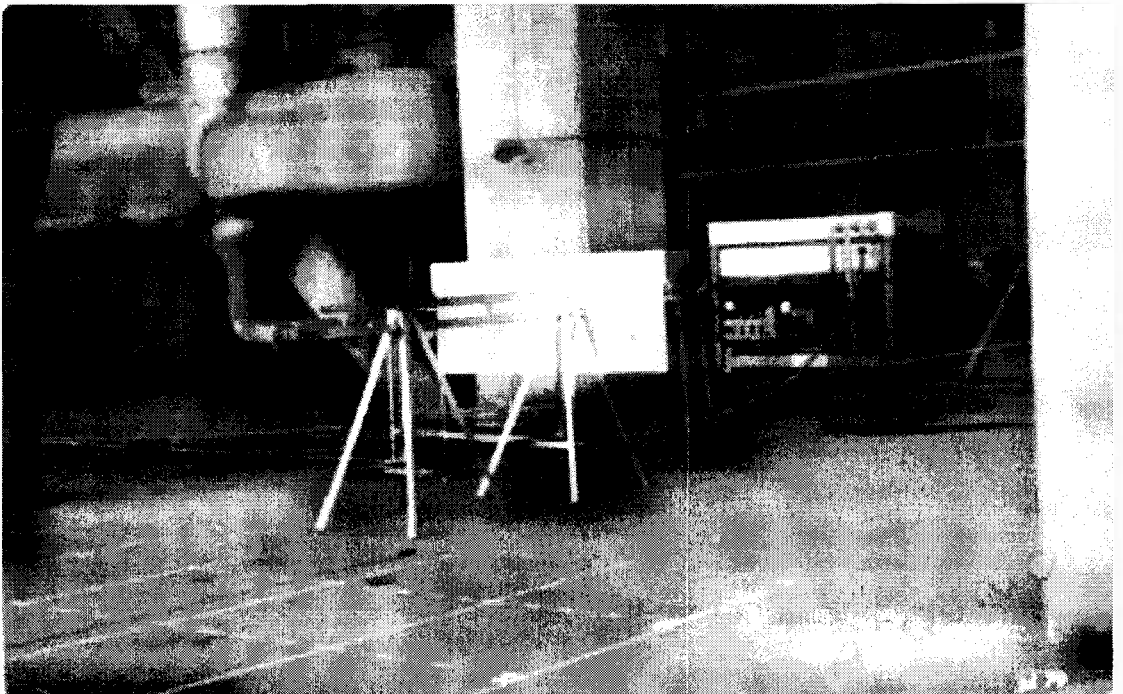
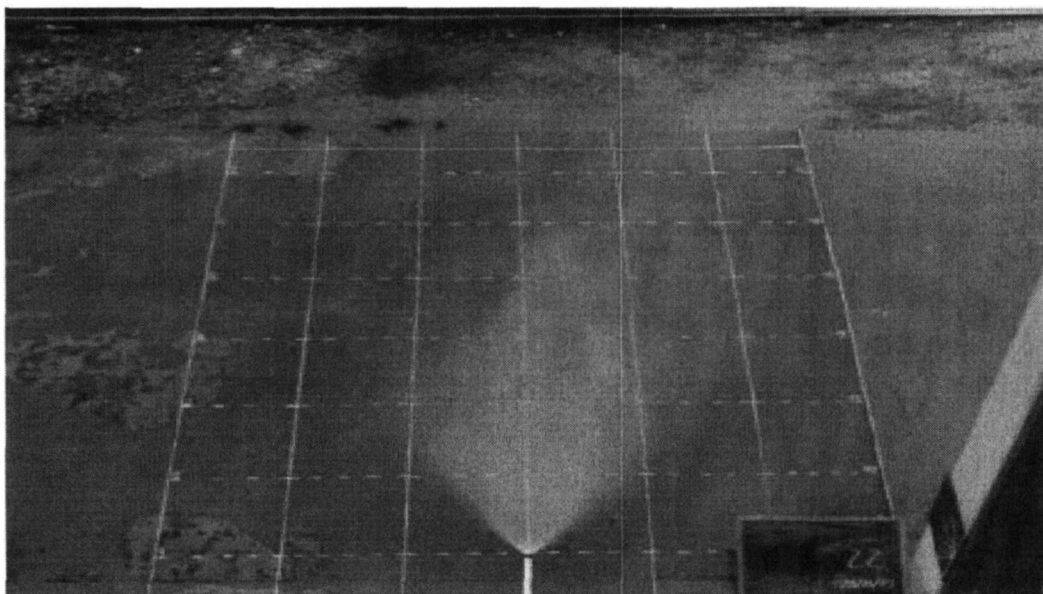
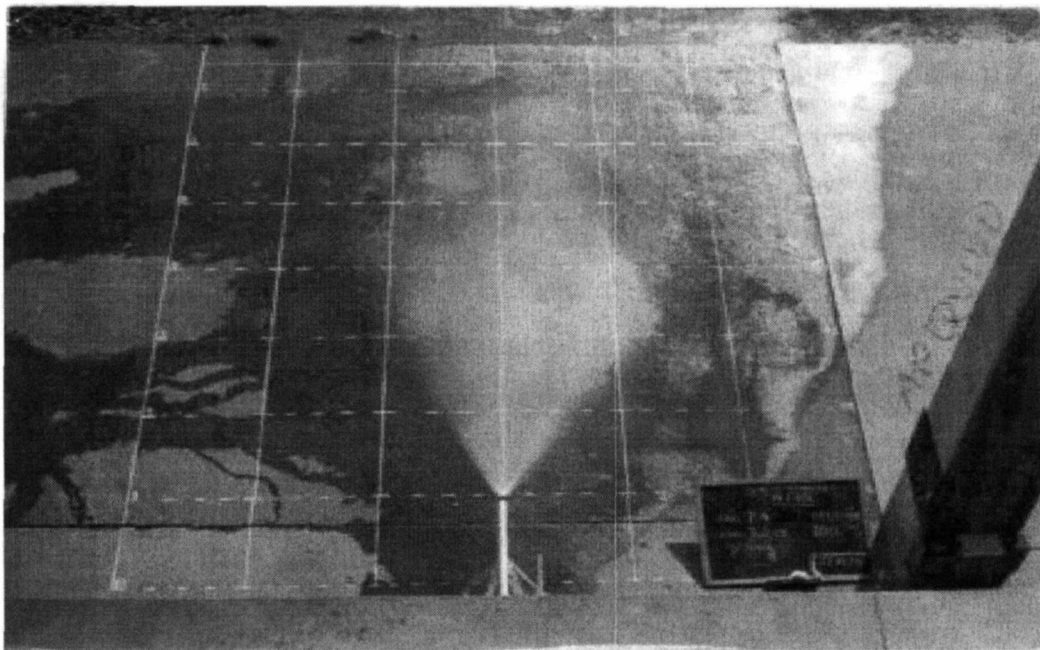


FIGURA 5 - bancada de testes de atomização do etanol com bomba AP

f) fabricação dos primeiros discos de ensaio de atomização tomando como referência a geometria dos discos fracionadores dos maçaricos de baixa pressão. Nas figuras 6 e 7 podem ser visualizados instantes dos ensaios de atomização.



FIGURAS 6 e 7 - detalhes observados durante ensaios de atomização

Nesta etapa procedeu-se à definição do “lay-out” do sistema-piloto de modo a implantarem-se os módulos de armazenagem de combustível alternativo, a linha de alimentação e o sistema de proteção e controle da caldeira para o combustível alternativo (independentes e com o mínimo de interferência nos sistemas existentes para óleo combustível), adaptando-se uma das caldeiras para operação comercial e mantendo-se a premissa tecnológica do “maior índice de similaridade” possível aos módulos existentes para o óleo combustível. Através de um sistema de combustível alternativo “em paralelo”, onde não apenas o combustível mas o próprio sistema-piloto possuísse uma maior flexibilidade operativa, aumentou-se o índice de confiabilidade da unidade geradora. Procedeu-se também ao projeto e instalação do sub-sistema piloto para armazenamento de 30 toneladas de etanol (figuras 8 e 9) e a linha para os ensaios de combustão em dois bocais de maçaricos da caldeira nº 4.(figura 10).



FIGURA 8 - vista da estação de armazenagem e unidade de bombeamento de etanol

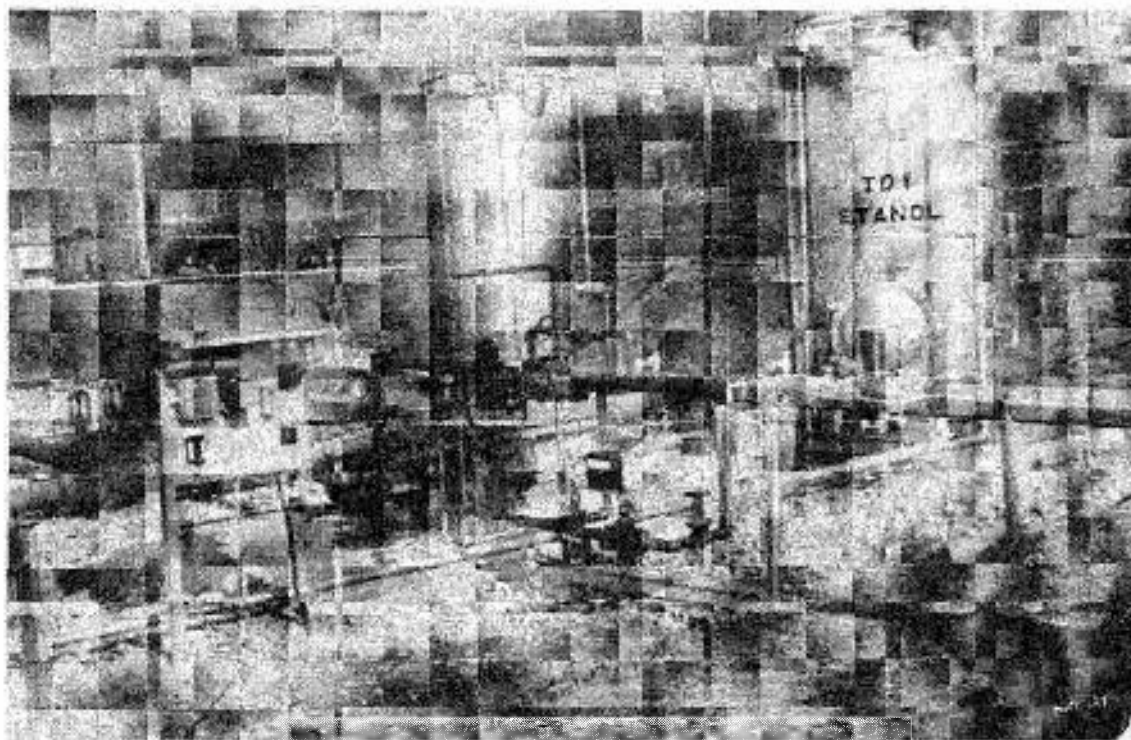


FIGURA 9 - vista da estação de armazenagem e detalhe do painel de controle da unidade de bombeamento de etanol

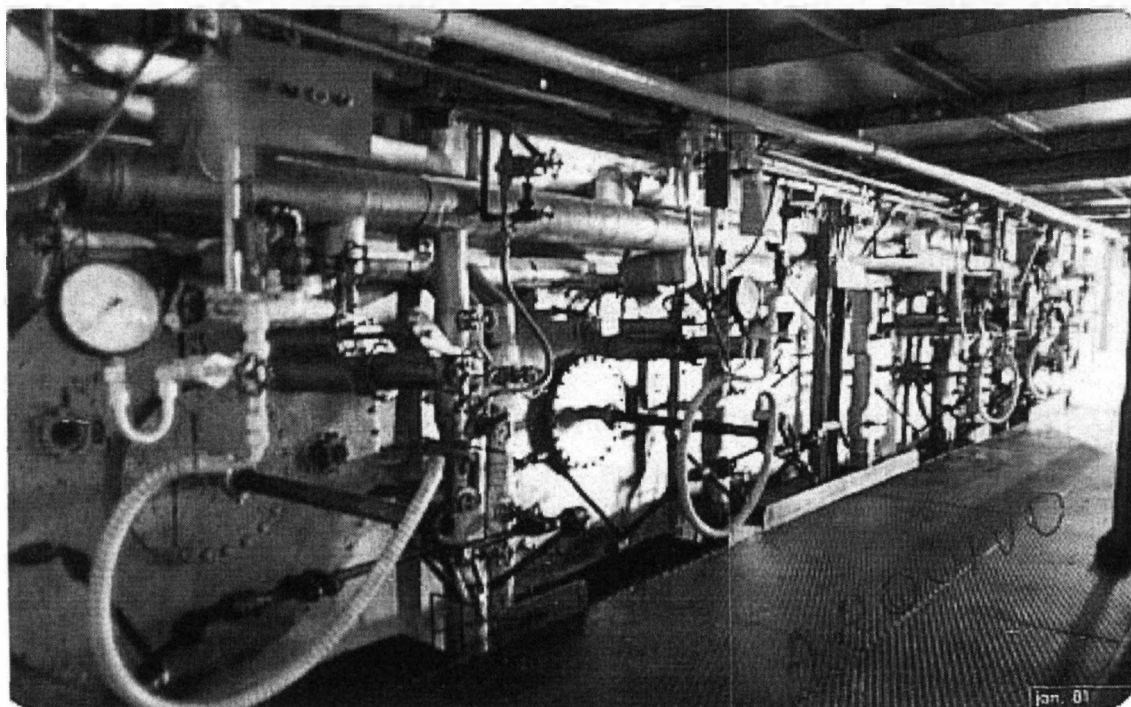


FIGURA 10 - vista da linha de alimentação dos maçaricos a etanol na caldeira 4

7.3 Etapa de desenvolvimento e implantação física dos equipamentos.

Completado o terceiro mês do estudo, esta etapa corresponde aos últimos testes e à montagem em definitivo do sistema, sendo as principais atividades :

- a) avaliação de eficácia do dispositivo de resfriamento de um dos tanques de etanol, e reavaliação da capacidade de tancagem necessária ao projeto;
- b) demonstração, durante ensaios de eficiência, e aprovação do protótipo do módulo de controle do fornecimento de combustível de um maçarico operando com etanol (instalado no bocal nº 11 da caldeira nº4), com tecnologia desenvolvida na Usina; contando com a presença do Ministro das Minas e Energia, Dr. César Cals;
- c) reavaliação da lista dos materiais a serem adquiridos com base nas avaliações do sub-sistema de 2 maçaricos, atualizando-se as especificações da estação de estocagem e bombeamento (para 16 maçaricos) e itens da linha de alimentação;
- d) realização de ensaios preliminares de queima, para confrontação dos dados obtidos na bancada de ensaio, em cada um dos bocais de maçaricos, utilizando-se os atomizadores-protótipo desenvolvidos na Usina.
- e) concluída a especificação e colocada a ordem de compra para a bomba do sistema-piloto junto à fabricantes nacionais e fornecedores de

equipamentos capazes de atender, embora com algumas restrições, aos principais itens dos sub-sistemas de bombeamento e de transferência. Um fabricante nacional de bombas centrifugas atendeu à solicitação do projeto com limitações na pressão e na capacidade, enquanto que encontraram-se no mercado interno várias opções de válvulas de retenção e de dispositivos de proteção;

Cada bocal de maçarico contava com dois cabeçotes distintos (Figura 11), permitindo rápida mudança de combustível e autonomia operativa em cada posição, com individualidade dos sistemas de controle e proteção da caldeira nº 4.

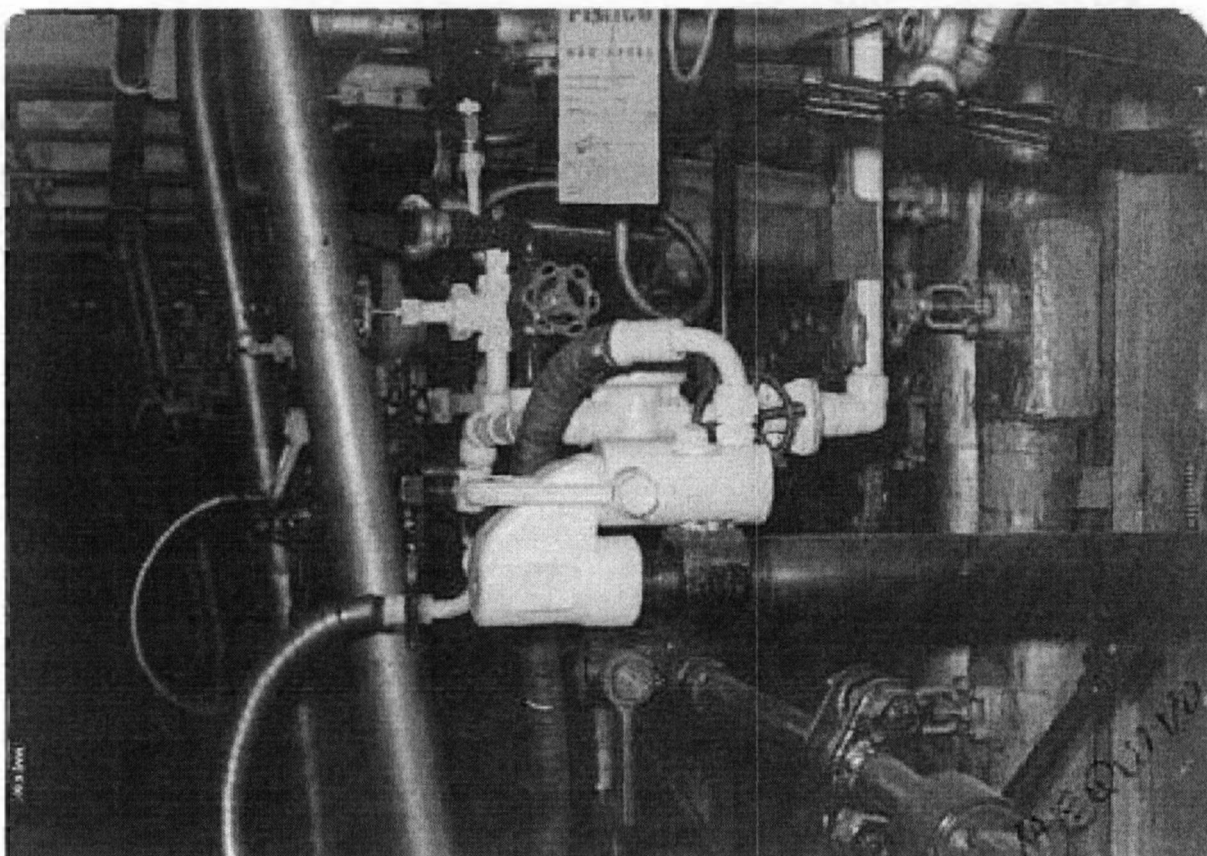


FIGURA 11 - engate flexível em um dos queimadores de etanol, durante ensaio de combustão.

Nas figuras 12 e 13 pode-se observar a similaridade dos cabeçotes a óleo e a etanol, sendo diferenciados apenas pela não existência de linha de retorno para o álcool etílico.

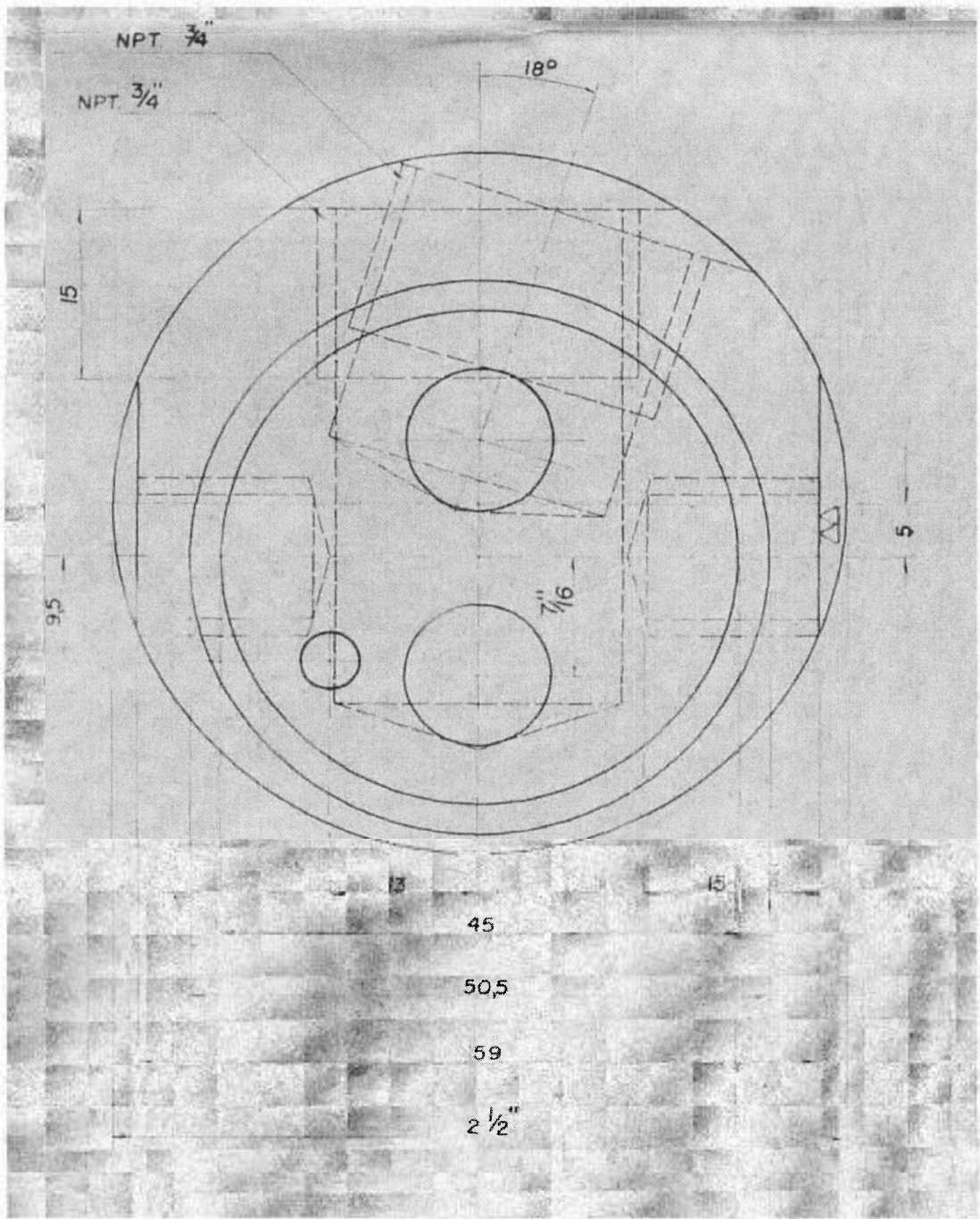


FIGURA 12 - detalhe do cabeçote de óleo combustível , com linha de retorno

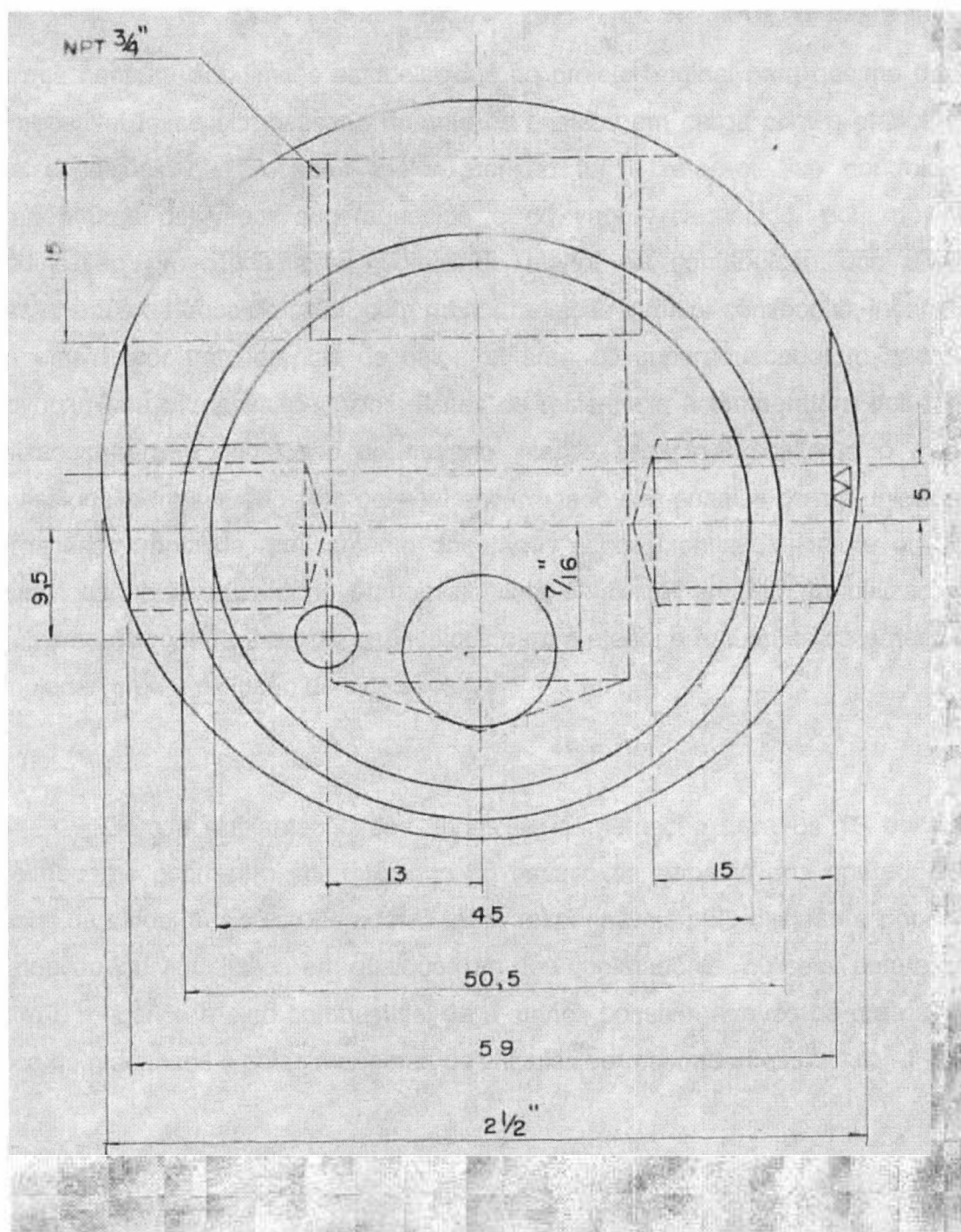


FIGURA 13 - detalhe do cabeçote de álcool etílico desenvolvido pelo PPE

Ainda nesta etapa destaca-se a imprescindível pesquisa das condições operacionais da caldeira quando queimando etanol, de modo a terem-se garantias

de que nenhum dos limites estabelecidos no projeto original para queima de óleo combustível fosse ultrapassado durante os ensaios em carga com o etanol. Uma das condições que recebeu maior atenção foi a referente ao controle das temperaturas do vapor superaquecido e do vapor reaquecido, pois devido a modificação provocada pela queima de etanol na contribuição dos diversos mecanismos de troca de calor, com menor radiação e maior convecção, incorreu-se em uma maior transferência de calor na área do superaquecedor, o que pode provocar uma ultrapassagem dos limites de resistência à temperatura dos metais utilizados para a confecção do mesmo. Nesse aspecto ressalte-se o cuidado profissional demonstrado pelo pessoal encarregado dos ensaios com a unidade em carga e sincronizada, previamente orientados e conscientizados sobre os riscos envolvidos no manuseio do etanol, incluindo-se o treinamento na utilização de equipamentos contra incêndio específicos para o etanol e em ações de emergência simuladas e para extinção de incêndios.

Com a implantação das linhas de alimentação para os 16 bocais de queimadores ocorreram interferências no espaço de trabalho dos operadores no frontal da caldeira. Estes operadores eram responsáveis pela decisão da operação e atuação individualizada em qualquer um dos queimadores, ou seja, pela escolha entre o maçarico a óleo combustível ou a etanol, possível através de uma simples troca de maçaricos e pelas manobras de válvulas correspondentes.

Na figura 14 mostra-se um diagrama com o arranjo das linhas de distribuição de etanol nos quatro patamares de maçaricos, no frontal da caldeira de unidade nº 4 da Usina; enquanto na figura 15 tem-se uma visão panorâmica das linhas de alimentação de óleo combustível (pretas) e de álcool etílico (brancas).

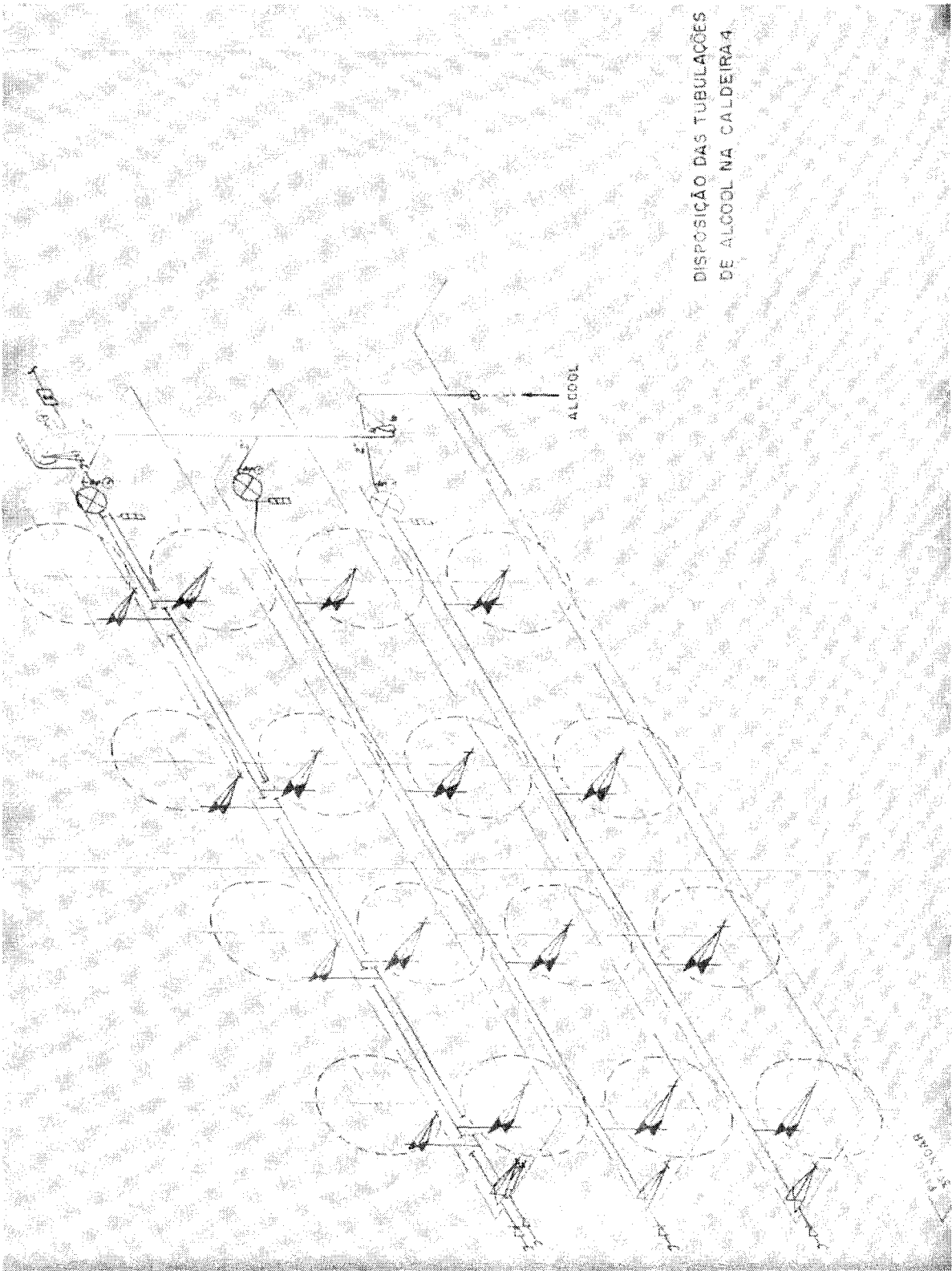


FIGURA 14 - disposição das linhas de alimentação de etanol no frontal da caldeira

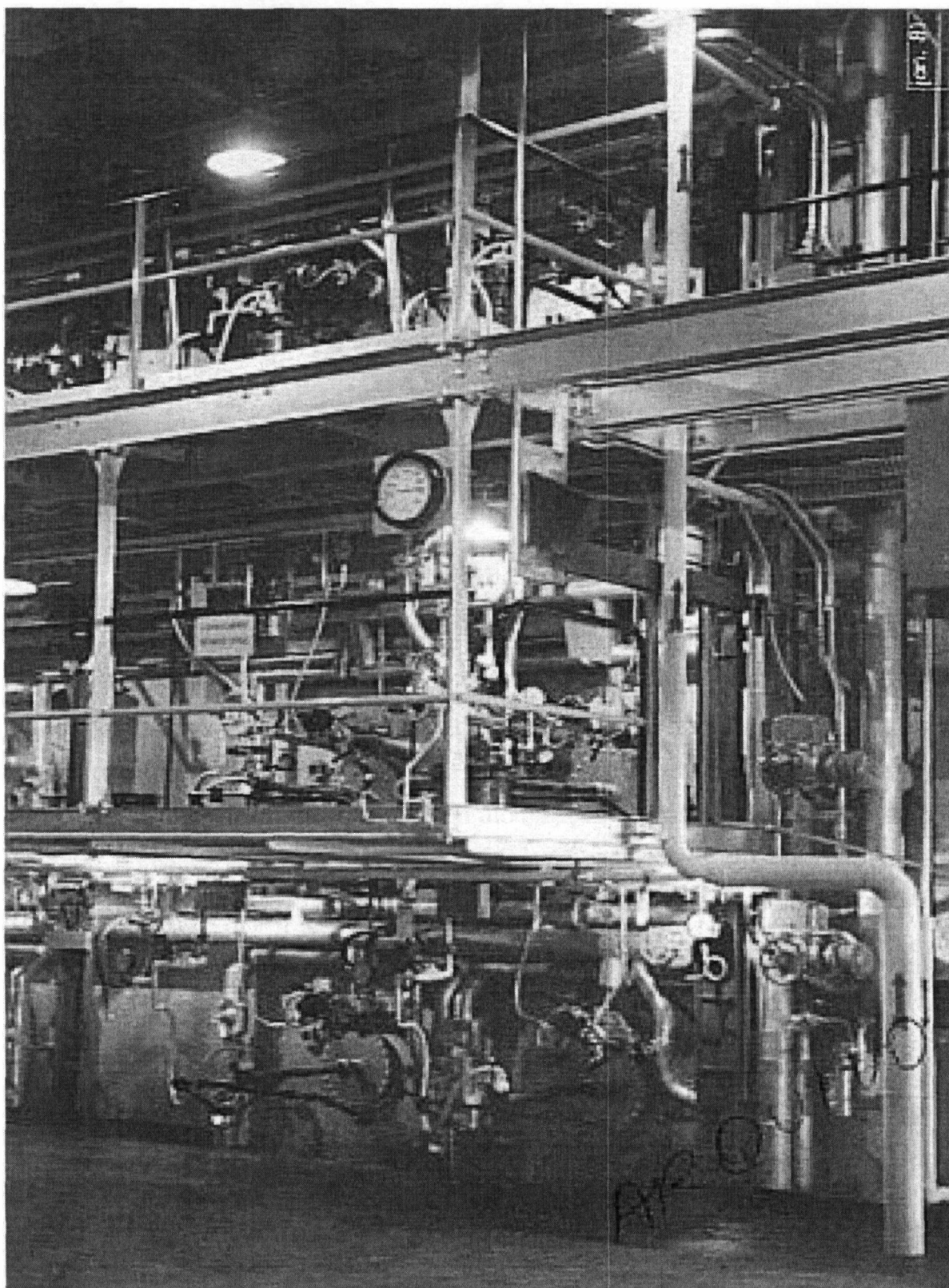


FIGURA 15 - disposição das linhas de alimentação de etanol no frontal da caldeira

7.4 Etapa de ensaios em carga

Com a instalação dos módulos de alimentação com álcool etílico nos 16 bocais da caldeira da unidade nº 4 da UTP e uma programação para treinamento e capacitação da equipe de operação nas ações de acendimento, apagamento e troca de maçaricos convertidos para o uso do etanol (avaliando-se a funcionalidade e operacionalidade segundo aspectos ergométricos), concluiu-se a montagem propriamente dita do Projeto Piloto do Etanol, passando-se à etapa que envolveu a realização de ensaios com a unidade mantida em serviço, no atendimento ao Sistema Elétrico Interligado.

Os ensaios de atomização, utilizando-se a bomba de alta pressão, resultaram na definição do modelo de disco atomizador (figura 16) que foi fabricado nas próprias oficinas da Usina, constituindo um jogo de discos atomizadores dimensionados em função da pressão e capacidade da bomba, especialmente adaptados para o etanol, permitindo uma atomização bastante estável numa ampla faixa de pressão, indicando que se obteria um excelente “turn down ratio” em comparação ao óleo combustível. Este fator permitiu um melhor controle de mudanças de cargas através da modificação da pressão do combustível, sem que fossem ultrapassados os limites de projeto da unidade.

Na tabela 9 apresenta-se a programação dos ensaios com cargas escalonadas, utilizando-se unicamente o etanol como combustível na caldeira, durante os quais monitoraram-se todos os parâmetros, que foram mantidos dentro dos limites de projeto para operação com óleo combustível.

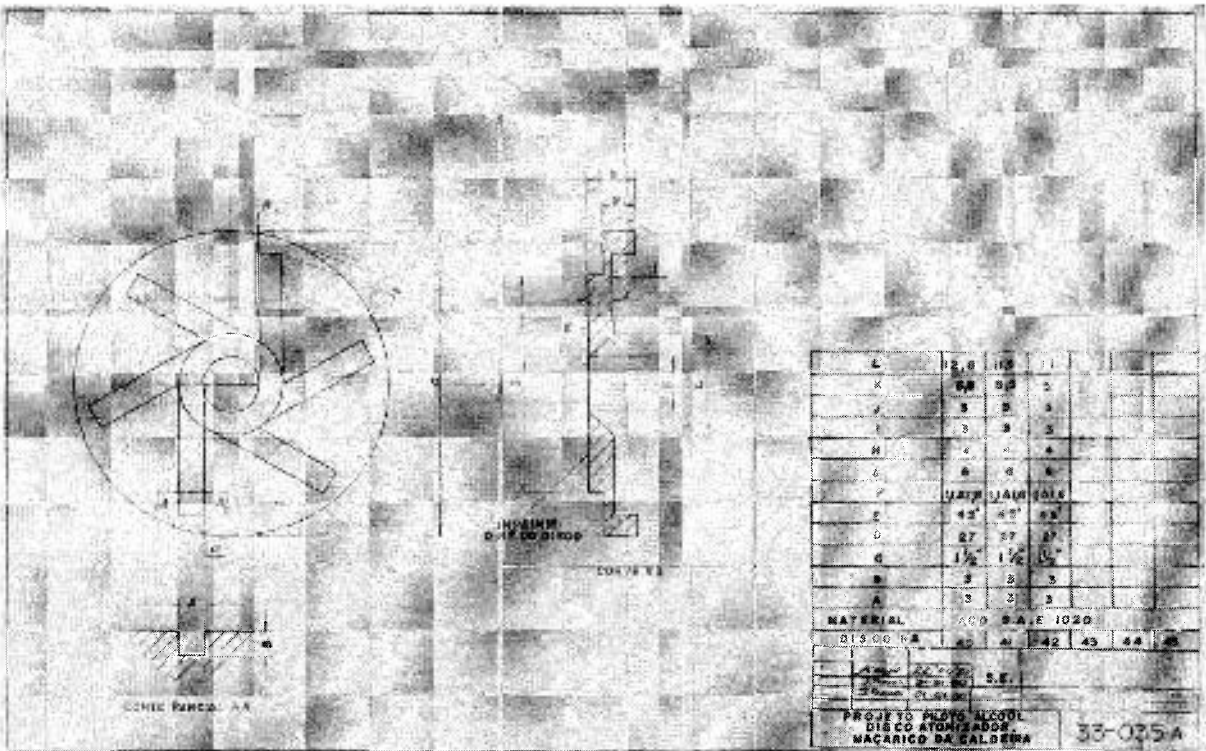


FIGURA 16 – Dimensionamento dos discos atomizadores projetados para o uso em maçaricos de álcool etílico

TABELA 9 – Programação de cargas durante ensaios com etanol na unidade nº 4

Carga estimada :	Nº de queimadores :	Data para realização:
25 MWe	4 maçaricos	dia 22.01.80
50 MWe	8 maçaricos	dia 23.01.80
80 MWe	12 maçaricos	dia 24.01.80
* preparativos e ajustes finais no sistema		dia 25.01.80
110 MWe	16 maçaricos	dia 26.01.80

Fonte : LIGHT/ UTP (com base na programação de cargas assumida junto à ELETROBRAS / MME)

Foram realizados os 4 ensaios em carga de acordo com a programação, sendo atingidas cargas finais de 24, 52, 86 e 110 MWe, respectivamente. O ensaio realizado no dia 26 de janeiro de 1980 foi considerado como a primeira operação em regime comercial de uma unidade termoeletrica operando com etanol, um combustivel renovavel e alternativo ao oleo combustivel normalmente utilizado; e contou com a presenca de diversas autoridades, inclusive com as do Presidente da ELETROBRÁS e do Ministro das Minas e Energia . Na figura 17, o momento durante o qual o Presidente da ELETROBRAS ouvia explicacoes a respeito do andamento do ensaio e dos objetivos atingidos pelo Projeto Piloto do Etanol.



FIGURA 17 - Momento da cerimônia por ocasião da 1ª operação comercial de uma unidade convertida para o etanol, com as presenças do presidente da ELETROBRAS e diversas autoridades.

No conjunto de tabelas 1 do APENDICE A são apresentados os principais registros feitos durante o ensaio de 26 de janeiro de 1980, com carga de 110 MWe. Embora o ensaio tenha sido “politicamente coroado de êxito”, tecnicamente apresentou limitações quanto à pressão de suprimento da bomba de etanol e em função da capacidade total de estocagem do sistema de armazenagem de etanol (60000 litros), bem como dificuldades para o controle do ar de combustão. O valor de 110 MWe, que representa mais de 80% da carga máxima da máquina, não foi todavia o limite máximo de carga possível de ser atingido mas tão somente o valor mais significativo até então obtido, em função das limitações previamente conhecidas.

Também deveriam ser melhoradas as condições operacionais com a adequação e modificação nos controles dos registros de ar, de modo a permitir-se o “ajuste fino” requerido no controle da combustão do etanol, proposto para realizar-se através de estudo técnico a ser efetuado em conjunto e sob coordenação da equipe de projetos da Babcock & Wilcox Co., fabricante das caldeiras, nos Estados Unidos. Nessas condições espera-se a eficiência e a estabilidade da combustão, atingindo-se valores superiores de carga, em torno da carga máxima da unidade (teoricamente estimado em ligeiramente superior aos 136 MWe, na ordem de 140 MWe), mas sempre dentro dos valores limites estabelecidos no projeto original, notadamente com relação às temperaturas dos gases e do vapor nas saídas dos superaquecedores e dos reaquecedores (pois constatou-se existir disponibilidade de água de superaquecimento para manter-se o controle das temperaturas com cargas ainda maiores).

Os cálculos de rendimento da unidade operando com etanol, com carga de 110 MWe, são apresentados na tabela 2 do APENDICE A, inclusive com base no valor de carga média de 105 MWe, enquanto os da transferência de calor na caldeira estão dispostos na tabela 3 do mesmo.

8 ENSAIO COMPLEMENTAR

Após os quatro ensaios em carga, a unidade nº 4 entrou em manutenção corretiva programada. O Projeto Piloto do Etanol, por constituir-se como um sistema “em paralelo” ao existente para o óleo combustível e pelas “facilidades operativas” decorrentes de sua similaridade com este, manteve-se numa condição de reserva, aguardando procedimentos para implementação e ser formalmente constituído por:

- a) estação de recebimento e de bombeamento de etanol para o(s) tanque(s) de estocagem;
- b) tanque(s) de estocagem de etanol (ou adaptação de um dos tanques de óleo existentes);
- c) estação de transferência de etanol, do(s) tanque(s) de estocagem para o tanque de serviço do sistema - a ser instalado, ou direto à(s) caldeira(s);
- d) linha de transferência entre tanques;
- e) tanque de serviço (de média capacidade, a ser instalado);
- f) estação de bombeamento de etanol para a(s) unidade(s);
- g) linha(s) de alimentação do tanque de serviço para as linhas de distribuição aos queimadores frontais da(s) caldeira(s);

h) unidades de controle e proteção, integráveis ao sistema de controle e proteção existente.

O álcool etílico caracteriza-se como mais uma solução alternativa para substituição do óleo combustível, sendo uma opção de caráter nacionalista, de fonte renovável e bem menos poluidora, com menor impacto ambiental, podendo conjunturalmente tornar-se economicamente viável, a se considerarem ainda os ganhos sociais e ambientais decorrentes de sua produção e utilização.

Para a elaboração da proposta técnica para conversão em definitivo de uma das caldeiras da Usina Termoelétrica Piratininga para operar com etanol, dois parâmetros de dimensionamento (dois extremos operacionais) foram considerados, a saber:

a) operação da Usina para o atendimento da carga base

Caso as condições operativas do Sistema Elétrico Interligado exigissem a complementação térmica com a entrada da Usina na base, a operação de ao menos uma das unidades geradoras utilizando-se o etanol seria imediatamente implementada e garantida pela interferência do Governo Federal sobre as condições de fornecimento desse combustível (preço subsidiado com continuidade de suprimento); todavia, em virtude do custo comercial do etanol ser superior ao do óleo combustível e das incertezas no fornecimento deste combustível por ocasião do Projeto, e por momentaneamente ocorrerem disponibilidades operativas no Sistema Elétrico, esta alternativa foi desconsiderada;

b) operação da Usina para o atendimento da ponta de carga com etanol

Em atendimento à ponta diária de carga, com fator de capacidade da ordem de 5% considerando-se a operação das unidades geradoras em regime contínuo como carga base; inicialmente aplicado a uma unidade de 136 MWe, na qual se procederiam aos ajustes necessários na caldeira (propondo-se o desenvolvimento em parceria com a Babcock & Wilcox Co.), com o consumo estimado de 120.000 litros diários de etanol. Após o comissionamento das alterações na caldeira e determinados os novos índices de confiabilidade, uma vez asseguradas condições de segurança operativa, seria ampliada a capacidade de estocagem de etanol pela adaptação de um dos tanques de serviço do sistema de óleo combustível, e negociadas as condições comerciais que tornassem economicamente viável e tecnicamente assegurado o fornecimento das quantidades de combustível requeridas; e ultimadas as providencias para a substituição do óleo combustível pelo etanol, de forma modular, possibilitando estender-se essa flexibilidade operacional a todas as unidades da Usina; implantando-se assim este novo combustível alternativo para a operação em atendimento às diretrizes estabelecidas pelo Governo Federal visando redução do consumo de derivados de petróleo.

Na tabela 4 do APÊNDICE A, apenas para efeito de memória técnica do Projeto, são apresentados os custos estimados para essa realização, em moeda março de 1980 (cruzeiros), uma vez que a conversão, embora possível para o padrão monetário atual, não acrescentaria informação tecnicamente útil, pois esses custos estavam baseados nos preços e nas disponibilidades tecnológicas da época, notadamente no que se refere à digitalização de sistemas supervisórios e de controle e proteção.

Após o encerramento oficial do Projeto Piloto do Etanol (em 31 de janeiro de 1980), por decisão e responsabilidade do corpo técnico da Usina, procedeu-se a um novo ensaio, com 110 MWe estáveis, objetivando a coleta de dados para o balanço térmico e um levantamento detalhado das condições de operacionais da unidade operando com etanol, uma vez que estava devidamente ajustada e em perfeitas condições operacionais após o período de manutenção. Neste ensaio complementar, realizado no dia 28 de abril de 1980, foram obtidos rendimentos da ordem de 35,85% para a unidade geradora e de 88,86% para a caldeira, considerados bons por estarem próximos aos valores previstos no projeto para operação com óleo combustível. Os principais dados constam do conjunto de tabelas 5, e das tabelas 6 e 7 do APÊNDICE A.

Em maio de 1980 preparou-se um resumo informativo com os principais dados sobre o Projeto Piloto do Etanol, constantes do conjunto de tabelas 8 do APÊNDICE A e, internamente, emitiu-se uma documentação técnica esclarecendo detalhes sobre a programação de elevação de carga utilizando etanol que, por questões de segurança, foi acompanhada por manobras utilizando-se óleo diesel e óleo combustível na caldeira da unidade nº 4, de forma a garantir-se que a caldeira estivesse ou permanecesse em serviço, queimando óleo combustível, tão logo se iniciasse ou encerrasse cada ensaio com o etanol; registrando-se o fato de que contabilizaram-se os gastos com esses combustíveis nos custos do projeto, não onerando diretamente ao processo de geração pela Usina, incluindo-se os ensaios dos discos fracionadores (de atomização) que envolveram gasto de etanol sem aproveitamento térmico. A título de informação e para registro em memória, apresenta-se resumo dos custos dos combustíveis utilizados durante a realização do Projeto na tabela 9 do APÊNDICE A.

9 CONCLUSÕES

Os 110 MWe estabilizados, que representam cerca de 80% da carga máxima da unidade, não constituem valor máximo possível de ser obtido utilizando-se o etanol mas tão somente o mais significativo obtido (por questões de segurança, somente após a instalação de sistemas adicionais de proteção e controle da caldeira dedicados à combustão do etanol é que previa-se a elevação da carga aos níveis pretendidos pela ELETROBRAS, ou seja, entre 90 e 95% da carga máxima da unidade). Recomenda-se a realização de novos ensaios, para elevação desta marca, após a instalação de sensores de chama e de controladores com dispositivos de segurança nos queimadores a etanol, integrados ao sistema de controle geral existente para operação com óleo combustível, de acordo com o descrito em relatório interno da LIGHT, emitido em maio de 1980, onde se firma o propósito de proceder à conversão em definitivo, tomando-se por base o consumo específico de 0,38 kg/kWh obtido no balanço térmico realizado no dia 28.04.80 (esta proposta incorre em um consumo anual de 45.000.000 litros de etanol para a unidade operando no atendimento da ponta, considerando-se um fator de capacidade de 5% para uma potência de 110 MWe).

Considerando-se apenas os custos da proposta para adaptação da unidade nº 4 da UTP, da ordem de 1% dos custos estimados na ocasião para construção de uma nova usina hidroelétrica de 110 MWe para o atendimento da ponta de carga diária, economicamente se justificava a adaptação de uma das caldeiras da UTP para a operação com o etanol. O autor, com o apoio de uma equipe de técnicos da Usina propôs o desenvolvimento deste projeto de adaptação,

a concluir-se com o recebimento dos materiais num período de nove meses e executando a montagem em uma das unidades no período de um mês. Ensaio com outros combustíveis alternativos, líquidos voláteis ou gases, também poderiam ser realizados com maior segurança numa caldeira adaptada, no desenvolvimento de novos estudos sobre a viabilidade da utilização destes combustíveis em caldeiras originalmente projetadas para o óleo combustível.

O Projeto Piloto do Etanol evidenciou a viabilidade técnica da utilização em escala industrial do álcool etílico hidratado como um combustível alternativo ao óleo combustível, e cuja utilização deve ser avaliada considerando-se também os aspectos de sustentabilidade e os ganhos sociais, ambientais e financeiros decorrentes dos processos produtivos e do uso em substituição ao óleo combustível derivado do petróleo; e como resultado direto deste estudo destaca-se que:

- a) a conversão de caldeiras para a queima de etanol deve ser objeto de estudo específico em função de seu projeto original, especialmente quanto às condições de combustão, visando garantia da segurança operacional; e para tal é recomendada a participação da projetista ou montadora ;
- b) para a operação em regime de uma caldeira queimando etanol será necessária a implementação de sistemas adicionais de proteção e controle da caldeira, visando a segurança da combustão, em especial para o controle da perda de chama;
- c) devem ser desenvolvidos conjuntos de queima (discos atomizadores e maçaricos) e realizadas alterações nos registros de ar e ajustes nos sistemas de controle e proteção da caldeira;

- d) deve ser efetuado o acompanhamento das condições das trocas térmicas, notadamente na região dos superaquecedores;
- e) por ser o etanol um combustível mais volátil são necessários cuidados especiais quanto à sua armazenagem, manipulação e bombeamento;
- f) embora não quantificados, pelo fato de não incorrer na emissão de compostos de enxofre, a utilização do álcool etílico torna-se uma opção ambientalmente mais adequada.

A utilização de combustíveis fósseis incorre no projeto, instalação, operação e manutenção de equipamentos complementares e sistemas auxiliares necessários para o acompanhamento do controle ambiental em plantas complexas, resultando em custos operacionais adicionais. Propõe-se a utilização de um combustível que responda a um rápido “ciclo de carbono”, preferencialmente fechado, sendo portanto renovável e ecologicamente mais aceitável, e que considere os aspectos da biodiversidade; que não cause tantos impactos ambientais decorrentes da emissão de gases de combustão altamente tóxicos e poluentes; e com custos de produção e comercialização que não dependam de políticas externas ou interferências decorrentes de crises internacionais, mas de políticas internas que contemplem os ganhos sociais e ambientais, observem os princípios de sustentabilidade e reafirmem o comprometimento com o desenvolvimento de tecnologia e a manutenção da soberania nacional. O posicionamento do autor é o de que o uso do álcool etílico hidratado como alternativa deve ser avaliado dentro do atual contexto, como uma opção tecnicamente viável e que foi testada e constatada, com êxito, através do Projeto Piloto do Etanol.

APÊNDICE A

- *transcrição de relatórios técnicos do PPE*

Uma característica, não só da Usina Termoelétrica Piratininga mas das usinas térmicas e instalações industriais mais antigas, é a de manter-se em seus procedimentos as unidades inglesas (empresas inglesas, canadenses ou norte-americanas, são fabricantes de peças e equipamentos ou responsáveis pelas montagens, comissionamentos, acompanhamento e suporte técnico ao longo da vida útil da instalação ou equipamento), não tendo sido adotadas as unidades do Sistema Internacional pois envolveria mudanças físicas na instrumentação e “adequação” dos conjuntos de normas e procedimentos operativos. Dessa forma, os dados constantes dos diagramas, balanços térmicos e nos relatórios de operação da UTP apresentarão unidades inglesas ou métricas (por serem unidades importantes e amplamente empregadas, embora de uso restrito, o que facilita a troca de informações e dados entre instalações em todo o mundo – CIPM,1969); sendo a conversão para o Sistema Internacional feita gradativamente por ocasião das modernizações ou a instalação de novas unidades.

Este estudo também tem por objetivo criar uma memória técnica do evento, portanto procurou-se transcrever integralmente os dados e registros efetuados por ocasião da experimentação prática do Projeto Piloto do Etanol, inclusive os financeiros; não sendo efetuada a conversão das unidades, o que é rapidamente realizável através da utilização de programas de conversão de unidades disponíveis na Internet; e sempre que necessário à compreensão do texto, faz-se uma anotação explicativa no rodapé da tabela.

TABELA 1 (A) – ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETÍLICO HIDRATADO (94 %)

Data: 26 de janeiro de 1980

Caldeira nº 4

Carga: 110 MW

Geral:

Carga na saída do gerador	110.000 kW
Etanol consumido	54.000 l/h 43.600 kg/h
Consumo específico do etanol	0,491 l/kWh 0,396 kg/kWh
Rendimento da unidade	34,44 %
Rendimento da caldeira	91,97 %

Gerador:

Carga reativa	15.000 kVA
Tensão	14.500 V
Corrente	4.400 A
Tensão de excitação	170 V
Energia consumida nos auxiliares	6.000 kWh/h
Porcentagem de energia consumida	5,45 %
Pressão de hidrogênio	20,30 psig
Pureza do hidrogênio	96 %

Turbina:

Vazão do vapor principal	820.000 lb/h
Pressão do vapor principal	1.310 psig
Temperatura do vapor principal	995 °F
Pressão do vapor na exaustão - baixa pressão	25,85 "Hg

Fonte : LIGHT/UTP (com base em dados levantados pelo PPE)

TABELA 1 (B) – ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETÍLICO HIDRATADO (94 %)

Turbina:

Pressão atmosférica	27,50 "Hg
Pressão absoluta	1,75 "Hg
Temperatura do vapor na exaustão - baixa pressão	102 °F
Pressão do vapor na exaustão – alta pressão	400 psig
Temperatura do vapor na exaustão – alta pressão	690 °F
Vazão do vapor na exaustão - alta pressão	795.499 lb/h
Vazão do vapor reaquecido	726.130 lb/h
Pressão do vapor reaquecido	360 psig
Temperatura do vapor reaquecido	1.025 °F

Caldeira:

Água na entrada do economizador

Vazão	805.000 lb/h
Pressão	1.410 psig
Temperatura	450 °F
Entalpia	432 BTU/lb
Energia	347.760.000 BTU/h

Água na saída do economizador

Vazão	805.000 lb/h
Pressão	1.410 psig
Temperatura	590 °F
Entalpia	602 BTU/lb
Energia	484.610.000 BTU/h

Vapor na saída do tubulão

Vazão	805.000 lb/h
Pressão	1.410 psig
Temperatura	590 °F
Entalpia	1.177 BTU/lb
Energia	947.485.000 BTU/h

TABELA 1 (C) – ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETÍLICO HIDRATADO (94 %)

Caldeira:

Vapor na saída do superaquecedor primário

Vazão	805.000 lb/h
Entalpia	1.374 BTU/lb
Energia	1.106.380.000 BTU/h

Água de atemperação no superaquecedor

Vazão	15.000 lb/h
Abertura da válvula	30 %
Pressão	2.600 psig
Temperatura	285 °F
Entalpia	260 BTU/lb
Energia	3.900.000 BTU/h

Entrada do Superaquecedor secundário

Vazão	820.000 lb/h
Pressão	1.350 psig
Temperatura	775 °F
Entalpia	1.354 BTU/lb
Energia	1.110.280.000 BTU/h

Saída do Superaquecedor secundário

Vazão	820.000 lb/h
Pressão	1.320 psig
Temperatura	995 °F
Entalpia	1.492 BTU/lb
Energia	1.223.440.000 BTU/h

Entrada do Reaquecedor (sem água de atemperação)

Vazão	726.130 lb/h
Pressão	690 psig
Temperatura	400 °F
Entalpia	1.356 BTU/lb
Energia	984.632.280 BTU/h

TABELA 1 (D) – ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETÍLICO HIDRATADO (94 %)

Caldeira:

Saída do Superaquecedor (sem água de atemperação)

Vazão	726.130 lb/h
Pressão	1.025 psig
Temperatura	360 °F
Entalpia	1.536 BTU/lb
Energia	1.115.335.680 BTU/h

Ventiladores (corrente do motor)

Ventilador forçado A	44 A
Ventilador forçado B	41 A
Ventilador induzido A	77 A
Ventilador induzido B	75 A

Temperaturas dos metais da caldeira

Superaquecedor sec	SSH-1L	900 °F
Superaquecedor sec	SSH-5R	870 °F
Superaquecedor sec	SSH-7L	1.030 °F
Superaquecedor sec	SSH-7R	940 °F
Reaquecedor	RSH-1R	750 °F
Superaquecedor prim	PSH-2L	870 °F
Superaquecedor prim	PSH-2R	820 °F
Superaquecedor prim	PSH-6L	880 °F
Superaquecedor prim	PSH-5R	700 °F
Topo do tambor	DR-2	580 °F
Fundo do tambor	DR-1	550 °F

Combustão

Vazão de combustível (etanol)	96.122 lb/h
Vazão de ar	600.000 lb/h
Quantidade de maçaricos acesos	16
Pressão de ar na caixa	1,2 "H ₂ O
Pressão de ar na fornalha	-0,23 "H ₂ O
Temp. ar na entrada do préaquec.	70 °F
Temp. ar na entrada do aquec. Ar	80 °F
Temp. ar na saída do aquec. Ar	525 °F
Pressão dos gases na saída superaq.	-0,7 "H ₂ O
Pressão dos gases na entrada economizador	-3,1 "H ₂ O
Pressão dos gases na entrada aquec.ar	-3,2 "H ₂ O
Pressão dos gases na saída aquec.ar	-8,4 "H ₂ O
Temp. gases na saída do economizador	680 °F
Temp. gases na saída do aquec. Ar	305 °F
Porcentagem de O ₂ nos gases (entr. Aq.ar)	2,2 %
Porcentagem de CO ₂ nos gases (entr. Aquec.ar)	14,5 %
Excesso de ar (correspondente a % de O ₂ entr.Aquec.ar)	11,0 %

TABELA 1 (E) – ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETÍLICO HIDRATADO (94 %)

Condensador:

Lado vapor		
	Temperatura do condensado	100 °F
	Pressão absoluta	1,75 "Hg
Lado água de circulação		
	Pressão na entrada	4,7 psig
	Pressão na saída	13,5 "Hg
	Temperatura na entrada	74 °F
	Temperatura na saída	90 °F
	Corrente na bomba de circulação A	44 A
	Corrente na bomba de circulação B	46 A

Auxiliares:

Bomba de extração de condensado B		
	Corrente na bomba	32 A
	Vazão	645.000 lb/h
	Pressão na descarga	200 psig
Condensador do vapor de selagem		
	Temperatura do condensado (saída)	102 °F
Resfriador de dreno do 5º ponto		
	Temperatura de dreno (lado quente)	112 °F
5º ponto de aquecimento		
	Pressão do vapor	11,5 "Hg
	Temperatura do vapor	200 °F
	Pressão da água (entrada)	180 psig
	Pressão da água (saída)	173 psig
	Temperatura da água (entrada)	112 °F
4º ponto de aquecimento		
	Pressão do vapor	7 psig
	Temperatura do vapor	400 °F
	Temperatura da água (dreno)	130 psig
	Pressão da água (entrada)	170 psig
	Pressão da água (saída)	160 psig
	Temperatura da água (entrada)	160 °F

TABELA 1 (F) – ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETÍLICO HIDRATADO (94 %)

Auxiliares:

3º ponto de aquecimento

Pressão do vapor	42 psig
Temperatura do vapor	590 °F
Temperatura da água (entrada)	215 °F
Temperatura da água (saída)	285 °F

Bomba de alimentação

Pressão na descarga	2.600 psig
Pressão na sucção	57psig
Corrente no motor	260 A

2º ponto de aquecimento

Pressão do vapor	157psig
Temperatura do vapor	836 °F
Pressão da água (entrada)	2.600 psig
Pressão da água (saída)	2.600 psig
Temperatura da água (entrada)	285 °F
Temperatura da água (saída)	370 °F
Temperatura da água (dreno)	295 °F

1º ponto de aquecimento

Pressão do vapor	400 psig
Temperatura do vapor	690 °F
Pressão da água (entrada)	2.600 psig
Pressão da água (saída)	2.600 psig
Temperatura da água (entrada)	450 °F
Temperatura da água (saída)	384 °F

Fonte : LIGHT/UTP (com base em dados levantados pelo PPE)

Dados transcritos com base nos relatórios do Setor de Verificação de Desempenho da Usina Termoelétrica Piratininga, emitidos em 04 de fevereiro de 1980, sendo mantidos para efeito de autenticidade e correção histórica na forma e unidades adotadas na Usina à época do Projeto Piloto do Etanol.

TABELA 3 – Calculo da transferência de calor na caldeira – ensaio em 26.01.80

ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETÍLICO HIDRATADO (94 %)

Data: 26 de janeiro de 1980

Caldeira nº 4

Carga: 110 MW

Calculo da transferência de calor na caldeira

Dados do ensaio: a carga de 110 MW permaneceu estabilizada apenas por 3 minutos (portanto não estavam totalmente estabilizados)

Elemento	Troca de energia (kcal/h)	Energia disponível na saída (kcal/h)
combustão	*	274.680.000 + x
fornalha	116.643.147	158.036.853 + x
superaquec. secundário	28.515.989	129.520.864 + x
reaquecedor	32.936.875	96.583.989 + x
superaquec. primário	40.041.076	56.542.913 + x
economizador	34.485.803	22.057.110 + x
aquecedor de ar	x	22.057.110
chaminé	0	22.057.110

A troca de energia no aquecedor de ar foi considerada como sendo uma recirculação de energia (dentro do sistema caldeira)

A temperatura do gás registrada foi de 305 °F, na saída do aquecedor de ar, o que corresponde à aproximadamente 20.780.220 kcal/h, resultando numa perda de 1.276.890 kcal/h no percurso de troca de energia dos gases (uma perda de 0,465 % em relação à energia da combustão) .

$$\text{Rendimento bruto da caldeira} = \frac{\text{energia obtida}}{\text{energia fornecida}} = \frac{274.680.000 - 22.057.110}{274.680.000} \text{ kcal/h}$$

$$\text{Rendimento bruto da caldeira} = \frac{252.622.890}{274.680.000} = 0,9197$$

Rendimento bruto da caldeira = 91,97 % (durante a 1ª operação comercial com etanol)

TABELA 4 – Calculo da estimativa de dispêndios para implantação do Sistema Etanol

Estimativa de dispêndios Moeda “Março 1980”	
Item :	Cr\$
- adaptação do tanque de serviço de óleo combustível nº 2 como tanque de estocagem de etanol (limpeza, modificações na estrutura e instalação de novo sistema de proteção contra incêndio)	1.030.000,00 1.030.000,00
- estação de bombeamento de etanol para a caldeira	
. materiais importados	130.000,00
. despesas comerciais para importação	85.000,00
. materiais nacionais	<u>1.230.000,00</u>
	1.445.000,00
- linha de alimentação de etanol para a caldeira (da estação de bombeamento até os maçaricos de etanol)	
. materiais importados (SCP da caldeira).....	10.050.000,00
. despesas comerciais para importação	6.432.000,00
. materiais nacionais	<u>3.063.000,00</u>
	19.545.000,00
- mão-de-obra	
. montagem	3.582.000,00
. supervisão técnica do fabricante da caldeira	303.000,00
. contratação de ensaios térmicos locais	<u>95.000,00</u>
	3.980.000,00
total estimado para adaptação de uma unidade de 136 MW para etanol	
	Cr\$ 26.000.000,00

Fonte : LIGHT/UTP (com base em dados levantados pelo PPE)

- Originalmente, no documento utilizava-se a notação “Cr\$ mil” para representar milhares de cruzeiros, que à época corresponderiam a 550 mil dólares americanos (1 US\$ = Cr\$ 46,60).

TABELA 5 (A) – ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETÍLICO HIDRATADO (94 %)

 ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETÍLICO HIDRATADO (94 %)

Data: 28 de abril de 1980

Caldeira nº 4

Carga : 110 MW

Geral:

Carga na saída do gerador	110.000 kW
Etanol consumido	52.000 l/h 41.990 kg/h
Consumo específico do etanol	0,4733 l/kWh 0,3817 kg/kWh
Rendimento da unidade	35,85 %
Rendimento da caldeira	88,86 %

Gerador:

Carga reativa	55.000 kVAr
Tensão	14.500 V
Corrente	4.400 A
Tensão de excitação	170 V
Energia consumida nos auxiliares	5.000 kWh/h
Porcentagem de energia consumida	4,55 %
Pressão de hidrogênio	20,28 psig
Pureza do hidrogênio	97 %

TABELA 5 (B) – ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETÍLICO HIDRATADO (94 %)

Turbina:

Vazão do vapor principal	747.360 lb/h
Pressão do vapor principal	1.796 psig
Temperatura do vapor principal	1.007 °F
Entalpia (vapor principal)	1.485 BTU/lb
Pressão atmosférica	27,55 "Hg
Pressão absoluta	1,76 "Hg
Temperatura do vapor na exaustão - baixa pressão	101 °F
Pressão do vapor na exaustão – alta pressão	390 psig
Temperatura do vapor na exaustão – alta pressão	625 °F
Vazão do vapor na exaustão - alta pressão	718.126 lb/h
Entalpia (alta pressão)	1.321 BTU/lb
Vazão do vapor reaquecido	656.000 lb/h
Pressão do vapor reaquecido	356 psig
Temperatura do vapor reaquecido	986 °F
Entalpia (reaquecido quente)	1.516 BTU/lb
Energia trocada	935.565.783 BTU/h
Energia obtida no gerador	375.401.180 BTU/h
Eficiência do conjunto turbina-gerador	40,13 %

Caldeira:

Água na entrada do economizador	
Vazão	744.000 lb/h
Pressão	1.898 psig
Temperatura	434 °F
Entalpia	416 BTU/lb

TABELA 5 (C) – ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETÍLICO HIDRATADO (94 %)

<u>Caldeira:</u>		
Água na saída do economizador	Vazão	744.000 lb/h
	Pressão	1.893 psig
	Temperatura	484 °F
	Entalpia	469 BTU/lb
Vapor na saída do tubulão	Vazão	744.000 lb/h
	Pressão	1.876 psig
	Temperatura	629 °F
	Entalpia	1.142 BTU/lb
Perda de vapor saturado	Vazão	3.640 lb/h
Água de atemperação no superaquecedor	Vazão	7.000 lb/h
	Pressão	2.548 psig
	Temperatura	290 °F
	Entalpia	264 BTU/lb
Entrada do Superaquecedor secundário	Vazão	747.360 b/h
	Pressão	1.840 psig
	Temperatura	761°F
	Entalpia	1.319 BTU/lb
Entrada do Reaquecedor	Vazão	656.000 lb/h
	Pressão	385 psig
	Temperatura	625 °F
	Entalpia	1.321 BTU/lb
Água de atemperação no reaquecedor	Vazão	0 lb/h
Ventiladores (corrente do motor)		
	Ventilador forçado A	43 A
	Ventilador forçado B	39 A
	Ventilador induzido A	69 A
	Ventilador induzido B	77 A

Fonte : LIGHT/UTP (com base em dados levantados pelo PPE)

TABELA 5 (D) – ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETÍLICO HIDRATADO (94 %)

Combustão	Poder calorífico inferior	6.285 kcal/kg
	Densidade a 20 °C	0,8075 kg/l
	Vazão de combustível (etanol)	41.990 lb/h
	Temperatura do combustível (etanol)	74 °F
	Quantidade de maçaricos acesos	16
	Vazão de ar	263.088 lb/h
	Pressão de ar na caixa	1,6 "H ₂ O
	Pressão do combustível (etanol)	253 psig
	Temp. ar na entrada do aquec. Ar	87 °F
	Temp. ar na saída do aquec. Ar	468 °F
	Pressão dos gases na fornalha	-0,45 "H ₂ O
	Pressão dos gases na saída superaq.	-0,70 "H ₂ O
	Pres. gases na entrada economizador	-3,10 "H ₂ O
	Pres. gases na entrada aquec.ar	-3,20 "H ₂ O
	Pres. gases na saída aquec.ar	-7,90 "H ₂ O
	Temp. gases na saída do economizador	605 °F
	Temp. gases na saída do aquec. Ar	280 °F
	% de O ₂ nos gases (entr. Aquec.ar)	1,4 %
	% de CO ₂ nos gases (entr. Aquec.ar)	14,6 %
	Exc.ar (correspondente a % de O ₂ entr.Aquec ar)	7,0 %
Energia fornecida		263.907.150 BTU/h
Energia obtida		234.501.696 BTU/h
Eficiência da caldeira		88,86 %

Fonte: LIGHT/UTP (com base em dados levantados pelo PPE; anexados ao Relatório Especial UTP)

Dados transcritos com base nos relatórios do Setor de Verificação de Desempenho da Usina Termoeletrica Piratininga e Relatório Especial para a Presidência da LIGHT, emitidos em maio de 1980; sendo mantidos para efeito de autenticidade e correção histórica, na forma e unidades adotadas na Usina à época do Projeto Piloto do Etanol.

TABELA 6 – Calculo do Rendimento da unidade geradora nº 4 operando com etanol, em carga de 110MWe

Calculo do Rendimento da unidade geradora nº4 operando com etanol, em carga de 110MW

Energia gerada 110.000 kWh

Leitura do etanol consumido (medidor) 52.000 l (x 0,8075) ou 41.990 kg

P. C. I. de 6.285 kcal/kg (calculado como valor para o álcool etílico hidratado - 94%)

$$\text{Rendimento} = \frac{94.600.000 \text{ kcal}}{263.907.150 \text{ kcal}} = 35,85 \%$$

Consumo específico : 0,4733 l/kWh ou 0,3817 kg/kWh

Nota : o poder calorífico inferior do etanol – 94% foi calculado pelo Laboratório Químico como sendo de 6.285 kcal/kg

Calculo do rendimento da caldeira nº 4 operando com etanol no dia 28 de abril de 1980 (Balanço Térmico)

Energia fornecida 263.907.150 BTU/h

Energia obtida 234.501.696 BTU/h

Eficiência da caldeira (rendimento) 88,86 %

Fonte: LIGHT/UTP (com base em dados levantados pelo PPE; anexados ao Relatório Especial UTP)

Dados transcritos com base nos relatórios do Setor de Verificação de Desempenho da Usina Termoeletrica Piratininga e Relatório Especial para a Presidência da LIGHT, emitidos em maio de 1980; sendo mantidos para efeito de autenticidade e correção histórica, na forma e unidades adotadas na Usina à época do Projeto Piloto do Etanol.

TABELA 7 – Calculo da transferência de calor na caldeira - ensaio em 28.04.80

 ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETÍLICO HIDRATADO (94 %)

Data: 28 de abril de 1980

Caldeira nº 4

Carga: 110 MW

Calculo da transferência de calor na caldeira

Dados do ensaio:

a carga de 110 MW permaneceu estabilizada para realização do Balanço Térmico

Elemento	Troca de energia (kcal/h)	Energia disponível na saída (kcal/h)
combustão	*	263.907.150 + x
fornalha	126.177.960	137.729.190 + x
superaquec. secundário	31.263.201	106.465.989 + x
reaquecedor	32.235.466	74.230.523 + x
superaquec. primário	34.888.320	39.342.203 + x
economizador	9.936.749	29.405.454 + x
aquecedor de ar	x	29.405.454
chaminé	0	29.405.454

A troca de energia no aquecedor de ar foi considerada como sendo uma recirculação de energia (dentro do sistema caldeira)

$$\text{Rendimento bruto da caldeira} = \frac{\text{energia obtida}}{\text{energia fornecida}} = \frac{263.907.150 - 29.405.454}{263.907.150} \text{ kcal/h} \text{ kcal/h}$$

$$\text{Rendimento bruto da caldeira} = \frac{234.501.696}{263.907.150} = 0,8886$$

$$\text{Rendimento bruto da caldeira} = 88,86 \% \text{ (durante o Balanço Térmico de 28.04.80)}$$

 Fonte: LIGHT/UTP (com base em dados levantados pelo PPE; anexados ao Relatório Especial UTP)

Dados transcritos com base nos relatórios do Setor de Verificação de Desempenho da Usina Termoeletrica Piratininga e Relatório Especial para a Presidência da LIGHT, emitidos em maio de 1980; sendo mantidos para efeito de autenticidade e correção histórica, na forma e unidades adotadas na Usina à época do Projeto Piloto do Etanol.

TABELA 8 (A) – ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETÍLICO HIDRATADO (94 %)

 ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETÍLICO HIDRATADO (94 %)

Data: 28 de abril de 1980 Caldeira nº 4 Carga: 110 MW

Geral:

Carga na saída do gerador	110.000 kW
Etanol consumido	52.000 l/h 41.990 kg/h
Consumo específico do etanol	0,4733 l/kWh 0,3817 kg/kWh
Rendimento da unidade	35,85 %
Rendimento da caldeira	88,86 %

<u>Gerador:</u>	Carga reativa	55.000 kVAr
	Tensão	14.500 V
	Corrente	4.400 A
	Tensão de excitação	170 V
	Energia consumida	5.000 kWh/h
	Porcentagem de energia consumida	4,55 %
	Pureza do hidrogênio	97 %

Caldeira:

Água na entrada do economizador	Vazão	337.470 kg/h
	Pressão	133 kg/cm ²
	Temperatura	223 °C
	Entalpia	231 kcal/kg

 Fonte: LIGHT/UTP(resumo dos dados fornecidos à imprensa em maio de 1980 sobre o projeto piloto)

TABELA 8 (B) – ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETÍLICO HIDRATADO (94 %)

Caldeira :

Vapor na saída do tambor

Vazão	337.470 kg/h
Pressão	132 kg/cm ²
Temperatura	331 °C
Entalpia	634 kcal/kg

Vapor principal

Vazão	338.995 kg/h
Pressão	126 kg/cm ²
Temperatura	541 °C
Entalpia	825 kcal/kg

Vapor na entrada do Reaquecedor

Vazão	297.555 kg/h
Pressão	27,1 kg/cm ²
Temperatura	329 °C
Entalpia	733 kcal/kg

Água de atemperação no reaquecedor

Vazão	0 kg/h
-------	--------

Vapor Reaquecido quente

Vazão	297.555 kg/h
Pressão	25 kg/cm ²
Temperatura	530 °C
Entalpia	842 kcal/kg

TABELA 8 (C) – ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETÍLICO HIDRATADO (94 %)

Combustão

Poder calorífico inferior	6.285 kcal/kg
Densidade a 20 °C	0,8075 kg/l
Vazão de combustível (etanol)	41.990 kg/h
Temperatura do combustível (etanol)	23 °C
Quantidade de maçaricos acesos	16
Pressão de ar na caixa	40 mmH ₂ O
Pressão do combustível (etanol)	18 kg/cm ²
Temp. ar na entrada do aquec. Ar	30 °C
Temp. ar na saída do aquec. Ar	242 °C
Pressão dos gases na fornalha	11 mmH ₂ O
Temp. gases na saída do aq. de ar	137 °C
Exc. ar (relação vazão de ar/comb)	6,2655 %

Energia fornecida	263.907.150 kcal/h
-------------------	--------------------

Energia obtida	234.501.696 kcal/h
----------------	--------------------

Rendimento da caldeira	88,86 %
------------------------	---------

Rendimento da unidade	35,85 %
-----------------------	---------

Consumo específico	0,3817 kg/kWh (gerado)
--------------------	---------------------------

Fonte: LIGHT/UTP(resumo dos dados fornecidos à imprensa em maio de 1980 sobre o projeto piloto)

TABELA 9 – ENSAIO DE QUEIMA DO ALCOOL ETILICO HIDRATADO (94 %)

ENSAIOS EXPERIMENTAIS DE QUEIMA DE ALCOOL ETILICO HIDRATADO (94%) Energia e consumo de combustíveis					
Data do ensaio	Carga máxima MW	Energia gerada MWh	Consumo de combustíveis		
			O.C. (kg)	Etanol (l)	Diesel (l)
19.01.80	*	*	*	4.530	1.796
20.01.80	*	*	*	10.653	1.328
21.01.80	*	*	9.397	8.226	1.562
22.01.80	*	*	6.406	*	*
	24	30	*	31.375	2.130
23.01.80	*	*	4.377	*	*
	24	23	14.156	*	*
	52	57	*	30.792	710
24.01.80	*	*	5.695	*	*
	52	69	23.376	*	*
	86	51	*	27.476	568
26.01.80	*	*	4.331	*	*
	90	148	40.053	*	*
	110	82	*	43.132	1.278
31.01.80	*	*	8.137	6.048	818
		460	115.928	162.232	10.180

Fonte: LIGHT/UTP (com base em dados levantados pelo PPE e relatório interno SVD-NA-VD 02/80)

Sendo:

- óleo combustível gerando 240 MWh77.585 kg

- óleo combustível gasto em manobras38.343 kg

115.928 kg

- Etanol consumido gerando 220 MWh132.775 l

- Etanol consumido em ensaio de discos 29.457 l

162.232 l

- óleo diesel para acendimento 10.180 l

REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS

ALY, O. F. **Estudo para conversão de partes poluentes dos gases de combustão de termoelétrica a óleo em matéria prima para fertilizante.** São Paulo, 2001, dissertação de mestrado IPEN/CNEN-USP

ARBEX, M. A. **Avaliação dos efeitos do material particulado proveniente da queima da plantação de cana-de-açúcar sobre a morbidade respiratória na população de Araraquara,SP,** São Paulo, 2001, tese de doutorado, FMUSP

BARRETO NETO, R. **Avaliação de métodos de combate à poluição do ar por SO₂ gerado em usinas termoelétricas.** São Paulo, 1980, 13p

BARRETO NETO, R. **Poluição do ar por usinas termoelétricas utilizando óleo combustível (resíduo de petróleo) como combustível.** São Paulo, 1980,

BREMEN MAGAZINE., **A fronteira gelada,** São Paulo, 2004, Ano 2, Nº 11 pg 16-25

CASTANHO, A.D.A. **A determinação quantitativa de fontes de material particulado na atmosfera de São Paulo.** São Paulo, 1999, dissertação de mestrado, Instituto de Física da USP.

GOLDEMBERG, J. (COORDENADOR) **Energia no Brasil: publicação ACIESP nº 2.** São Paulo, Academia de Ciências do Estado de São Paulo, 1976, 158p.

EPSTEIN, M. **Impacto ambiental das emissões aéreas das usinas termoelétricas – emissões de SO₂** – Revista Brasileira de Energia, Vol 1, nº 2, 1990

HAMMOND,A.L; METZ,W.D; MAUGH II,T.H. **O futuro energético do mundo.** Rio de Janeiro, Zahar Editores,1975, 269p.

LANDI, F. R. (COORDENADOR) **El Nino em 2002/2003 – impactos e perspectivas para os próximos meses.** Coordenadoria Estadual de Defesa Civil na região metropolitana de São Paulo, 2001

LIGHT – UTP -- STE, **Curso de Introdução às usinas termoelétricas.** São Paulo, 1980

LIGHT- UTP, **Desenvolvimento de tecnologia para produção de eletricidade a partir do etanol: adaptação da caldeira da Usina Térmica Piratininga para utilização do etanol como combustível alternativo.** São Paulo, 1980, 20p

LIGHT-UTP, **Curso de Instrução e Treinamento para formação de operadores da U. T. P.: apostilas L01 a L20 .** São Paulo, 1980

LIGHT- UTP- PPE, **Relatórios internos de andamento do Projeto Piloto do Etanol.** São Paulo, 1979/80

LIGHT- UTP- PPE, **Etanol como combustível alternativo para usinas termoeletricas**, São Paulo, 1980 (apostila para divulgação interna elaborada pelo autor)

LIMA, W. POLI, D.C.R. **Environmental significance of toxic trace elements from fossil fuel combustion** E4-23-02-03, UNESCO - Encyclopedia of Life Support System - EOLSS Publishers Co.Ltd, Oxford, United Kingdom, 2002

POLI, D.C.R.; ALY, O.F.; LIMA, W. **Algumas recomendações práticas para reformas de plantas termoeletricas e industriais**. Caderno UniABC de Engenharia. Ano II, n. 9, 13-20, 2000.

POLI, D.C.R.; LIMA, W.; ALY, O.F. **Conversão de partes poluentes dos gases de combustão de termoeletrica em matéria prima para fertilizante**. Caderno UniABC de Engenharia. Ano 1, nº 8, 52 - 60, 1999.

POLI, D.C.R.; LIMA, W.; CALVO, W.A.P.; ALY, O.F.; ANSON, J.M.A.; NETTO, N.F.A.; FRANK, N.W. **Pre-feasibility study for an electron beam flue gas treatment demonstration plant to Eletropaulo's Piratininga Power Plant**. International Proceeding of the Symposium on Radiation Technology for Conservation of the Environment, Zakopane, Poland, 8 - 12 September, 1997. IAEA-TEC-DOC-1023, 97-103, 1998.

POLI, D.C.R.; OSSO Jr., J.A.; RIVELLI, V.; VIEIRA, J.M. **Present state of EB removal of SO₂ and NO_x from combustion flue gases in Brazil**. Radiat. Phys. Chem. 46: 4-6, 1133-1136, 1995.

POLI, D.C.R.; RIVELLI, V.; LAROCA, M.E.M. **Estudo sobre o tratamento de gases tóxicos SO₂ e NO_x provenientes de combustão de óleo ou carvão por aceleradores de elétrons**. Anais do VI Congresso Brasileiro de Energia - VI CBE. I Seminário Latino Americano de Energia. Rio de Janeiro, 18 a 22 de outubro de 1993, v. III, p. 965-970.

POLI, D.C.R.; VIEIRA, J.M.; CAMPOS, C.A. **Tratamento de gases tóxicos SO₂ e NO_x por Irradiação com feixe de elétrons**. São Paulo, publicação IPEN 381, 1993.

POLI, D.C.R.; VIEIRA, J.M.; CAMPOS, C.A.; RIVELLI, V. **Estudo sobre o tratamento de gases tóxicos SO₂ e NO_x provenientes de combustão de óleo ou carvão por aceleradores de elétrons**. In: ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENERGIA NUCLEAR. Anais do I Encontro Nacional de Aplicações Nucleares, 25-29 de outubro de 1993. Caxambu, MG, 1993, p.163-4.

POLI, D.C.R.; ZIMEK, Z.A.; VIEIRA, J.M.; RIVELLI, V. **Electron beam removal of SO₂ and NO_x from combustion flue gases in Brazil** - National and International Cooperation. Proceedings of the Symposium on Regional Integration in Nuclear Energy - LAS/ANS, Rio de Janeiro, RJ, 2-6, July, 1995. 12p.

POLI, D.C.R.; ZIMEK, Z.A.; VIEIRA, J.M.; RIVELLI, V. **Technical and economical feasibility study of the electron beam process for SO₂ and NO_x removal from combustion flue gases in Brazil**. Proceedings of the 13th SMIRT - Post Conference Seminar no. 13 on Applications of Intelligent Software Systems in Power Plant, Process Plant and Structural Engineering, São Paulo, 229-244, August 21-23, 1995, C.C.R. EUR 17669 EN, 1997.

ROCHA, M. T. **Aquecimento global e o mercado de carbono: uma aplicação do CERT (Carbon Emission Reduction Trace)** Piracicaba, S.P, 2003, tese de doutorado, ESALQ-USP

RODRIGUES, E. C. **SOLUÇÃO ENERGÉTICA**. São Paulo, SP, Edições Unidas, 1983, 361p.

ROMEIRO, A.R. **Economia do Meio Ambiente: teoria, políticas e a gestão de espaços regionais** Campinas, SP, UNICAMP-IE, 1996, 384p.

SAMPA, M.H.O.; POLI, D.C.R.; LIMA, W.; OSSO Jr., J.A.; AOKI, P.E. **The use of nuclear techniques in environment. Segundo Seminário Internacional sobre Problemas Ambientais dos Centros Urbanos - Eco URBS'**. São Paulo, Brasil, 12 - 17, december, 1993. Abstracts vol., p.111-2.

VEJA, **O começo do fim**, São Paulo, 2004, edição Nº 1857, pg 116-126

VIEIRA, A.H.G. (COORDENADOR) **Consumo Energético no Brasil –perspectivas para 1990**. Co-edição CESP- Livraria Cultura, São Paulo, 1978

WILSON, C. L. **ENERGIA: PROJEÇÕES GLOBAIS 1985-2000 - relatório do Grupo de Estudos de Estratégias Energéticas** Rio de Janeiro, RJ, Atlântida, 1978, 289p.

ZANCHETA, M. N; POLI, D.C.R. **A mudança do combustível da Usina Termoeletrica Piratininga em função da qualidade ambiental**. São Paulo, 2004, 9 pg

Páginas da Internet

consultadas em :

<http://www.b2bremen.com.br>

MERCADO INTERNACIONAL DO PETROLEO – textos diversos sobre combustíveis

(junho 2004)

<http://www.mma.gov.br>

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE – informações sobre meio ambiente e Agenda 21

(junho 2004)

<http://www.mct.gov.br/>

MINISTERIO DA CIENCIA E TECNOLOGIA – informações sobre programas e legislação

(junho 2004)

<http://www.mme.gov.br/>

MINISTERIO DE MINAS E ENERGIA – informações sobre Balanço Energético e sobre o P P A

(junho 2004)

BIBLIOGRAFIA RECOMENDADA (complementar correlacionada)

BRASIL – PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA – SECRETARIA DE PLANEJAMENTO: CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTIFICO E TECNOLÓGICO - CNPq. **Avaliação tecnológica do álcool etílico.** Brasília, 1979.

BRASIL – PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA – SECRETARIA DE ASSUNTOS ESTRATÉGICOS. **Análise do Programa Nacional do Alcool.** Rio de Janeiro, 1990.

BRASIL – PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA – SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE. **Resolução CONAMA Nº 008.** Brasília, dezembro 1990.

BRASIL – MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO – SECRETARIA DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL – MIC / STI. **Tecnologia industrial de produção de álcool.** 1º Seminário de tecnologia industrial da produção de álcool. Brasília, agosto 1984.

BRASIL – MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO – SECRETARIA DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL – MIC / STI. **Etanol – combustível e matéria prima** - Semana de Tecnologia Industrial. Rio de Janeiro, de 01 a 04 dezembro 1976.

BRASIL – MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO – SECRETARIA DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL – MIC / STI. **Semana de Tecnologia Industrial** – IPT. São Paulo, novembro 1973, 300p.

BRASIL – MINISTÉRIO DA INDÚSTRIA E DO COMÉRCIO – SECRETARIA DE TECNOLOGIA INDUSTRIAL – MIC / STI – FUNDAÇÃO CENTRO TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS. **Estado da Arte da produção de etanol a partir da madeira** - Tecnologia de produção de etanol a partir de materiais celulósicos – Vol 1. Brasília, 1981.

BRASIL – CAMARA DOS DEPUTADOS - COMISSAO DE MINAS E ENERGIA. **Anais do Simpósio Nacional sobre Fontes Convencionais e Alternativas de Energia.** Brasília, junho de 1979, 1147p.

BRASIL -- **Legislação do Meio Ambiente** - compilação organizada. Editora LTr. São Paulo, 1999.

GOVERNO DO ESTADO DE SAO PAULO – SECRETARIA DA INDUSTRIA, COMERCIO, CIENCIA E TECNOLOGIA – COORDENADORIA DA INDUSTRIA E DO COMERCIO. **Biomassa florestal como fonte de energia alternativa ao óleo combustível.** São Paulo, GESP, setembro de 1982, 95p.

SECRETARIA DE ESTADO DA INDUSTRIA, COMERCIO, CIENCIA E TECNOLOGIA -SP; IPT; CESP; IPEN. **Anais do Simpósio sobre alternativas energéticas para transporte e indústria** São Paulo, agosto de 1979, Vol 1 e 2, 1153p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS - ABNT. **NR 20 – Líquidos combustíveis e inflamáveis.**

ATKINS, P. W. **Moléculas**. São Paulo, EDUSP, 2000, 199p.

B'RELLS, W. F. **Operação econômica e planejamento**. Santa Maria, RS, UFSM - Universidade Federal de Santa Maria – ELETROBRÁS: Fundo de Desenvolvimento Tecnológico, 1979, 333p.

BAINES, J. **Preserve a atmosfera**. São Paulo, Scipione, 1992, 47p.

BALESTIERI, J.A.P. **Cogeração**: geração combinada de eletricidade e calor. Florianópolis, SC. Editora da UFSC, 2002, 279p.

BAZZO, E. **Geração de vapor**. Florianópolis, SC, Editora da UFSC, 1995, 216p.

BERMANN, C. **Energia no Brasil: para quê? para quem?: crise e alternativas para um país sustentável**. São Paulo, Livraria da Física: FASE, 2001, 139p.

BORN, M. **Física atômica**. Lisboa, Portugal, Fundação Calouste Gulbenkian, 1986, 557p.

CBE – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA. **Anais do 1º Congresso Brasileiro de Energia**. Rio de Janeiro, dezembro de 1978

CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS S.A. - ELETROBRÁS. **PLAN 2015 National Electric Energy Plan, 1993 – 2015** - Vol. 1: Executive Report Summary. abril, 1994.

COMPANHIA ENERGETICA DE SÃO PAULO - CESP. **Consumo Energético no Brasil: perspectivas para 1990 – coletânea energética**. São Paulo, CESP/FDTE/EPUSP, 1978, 183p.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DA INDÚSTRIA. **Biomassa – coadjuvante na oferta total de energia** São Paulo, CNI – coleção Jose Ermírio de Moraes – Vol 8 , 1983, 113p.

CPFL – COMPANHIA PAULISTA DE FORÇA E LUZ S.A. **Anais do Seminário Alternativas para uma política energética**. São Paulo, CPFL - governo do Estado de São Paulo, dezembro de 1985, 504p.

DEMILLO, R. **Como funciona o clima**. São Paulo, Quark Books, 1998, 226p

ERICKSON, J. **Nosso planeta está morrendo**. São Paulo, Makron - McGraw Hill, 1992, 244p.

FIGENER-FICHTNER. **Cogeração**. São Paulo, IESP, 1993, 120p.

GAMA, R. **Engenho e tecnologia**, São Paulo, Livraria Duas Cidades Ltda, 1983, 359p.

GIBERT, A. **Origens históricas da física moderna**. Lisboa, Portugal, Fundação Calouste Gulbenkian 1984, 866p.

GOLDEMBERG, J. **Energia no Brasil**. São Paulo, SP, Livros Técnicos e Científicos, 1979, 171p.

GOLDEMBERG, J. **Energia, Meio Ambiente & Desenvolvimento**. São Paulo, EDUSP, 2001, 235p.

HILSDORF, J. W. **Química tecnológica**. São Paulo, Pioneira Thomson Learning, 2004, 340p.

INSTITUTO BRASILEIRO DO PETROLEO-IBP. **Curso de informação sobre combustíveis e combustão**. Rio de Janeiro, 1979.

INSTITUTO CUBANO DE PESQUISA DOS DERIVADOS DE CANA DE AÇÚCAR. **Manual dos derivados de cana de açúcar**. São Paulo, S.P., Associação Brasileira dos Institutos de Pesquisa Tecnológica - ABIPTi, 1999.

LORA, E.E.S.; NOGUEIRA, L.A.H. **Dendroenergia: fundamentos e aplicações**. Rio de Janeiro, RJ, Interciencia, 2003, 199p

LORA, E.E.S.; **Prevenção e controle da poluição nos setores energético, industrial e de transporte**. Rio de Janeiro, RJ, Interciencia, 2004, 481p

MC CLELLAN, A. L. **Química: uma ciência experimental**. Lisboa, Portugal, Fundação Calouste Gulbenkian, 1984, 866p.

MELLO, F. P. **Dinâmica e controle de geração**. Santa Maria, RS, UFSM - Universidade Federal de Santa Maria – ELETROBRÁS: Fundo de Desenvolvimento Tecnológico, 1979, 242p.

MORANDI, S. **Tecnologia e ambiente**. São Paulo, Copidart Editora, 2001, 173p

MORRISON, R; BOYD, R. **Química orgânica**. Lisboa, Portugal, Fundação Calouste Gulbenkian, 1996, 1510p.

NASCIMENTO, M.A.R.; LORA, E.E.S. **Geração termelétrica: planejamento, projeto e operação**. Rio de Janeiro, RJ, Interciencia, 2004, 1296 p

NOVAIS, V. **Físico-química e química ambiental**. São Paulo, Atual, 1993, 430p

OMETTO, J.G.S. **O álcool combustível e o desenvolvimento sustentado**. São Paulo, SP, PIC, 1998, 80p

PINGUELLI ROSA, L. (COORDENADOR) **Energia e crise**. Petrópolis, RJ, Vozes, 1984, 196p.

POLI, D.C.R.; VIEIRA, J.M.; CAMPOS, C.A.; RELA, P.R.; RIVELLI, V.; ALBUQUERQUE, A.M. **Treatment of coal-fired flue gas by electron beam irradiation**. INIS-CL—006. Short Communication Abstracts of the Regional Seminary on Radiation and Isotope Applications to the Environment. Santiago de Chile, Chile, 9-13 August 1993, p.13-14, 1993.

REIS L.B., SILVEIRA S., **Energia elétrica para o desenvolvimento sustentável**, São Paulo, EDUSP 2000

REIS L.B. **Geração de energia elétrica - tecnologia, inserção ambiental, planejamento, operação e análise de viabilidade**. Barueri, SP, Manole, 2003, 324p.

SOBRAL, H. R. **O meio ambiente e a cidade de São Paulo**. São Paulo, Makron books, 1996, 80p

ZANCHETA, M.N. **Aspectos tecnológicos referentes à repotenciação de usinas termoeletricas** São Paulo, 2000. Dissertação de mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

ZANCHETA, M.N.; NOGUEIRA JR, J. R.; SANTOS, A.A.; POLI, D.C.R. **A evolução da automação na Usina Termoeletrica Piratininga**. São Paulo, 2004, 17 p

ZIMEK Z., CHMIELEWSKI A. G.: **Present tendencies in construction of industrial electron accelerators applied in radiation processing**. Nukleonika, 38, 2, 3-20, 1993.