

Dessulfuração em Termoeletricas a Carvão

O Caso da Usina de Candiota II

J.L. Castellan, D. T. Chazan, M. L. d'Ávila

RESUMO

Este artigo apresenta a avaliação técnico-econômica de tecnologias de dessulfuração aplicáveis na Usina de Candiota II, RS. Contempla a atualização do estado-da-arte das tecnologias de dessulfuração e a avaliação técnica e econômica das tecnologias de maior potencial de aplicação ao caso específico, com o propósito de avaliar o impacto da dessulfuração nos custos de geração de energia elétrica na termoeletricidade movida a carvão. Concluiu-se que a utilização da tecnologia de Lavadores do gás com calcário é a opção mais atrativa. Esta alternativa apresentou um custo de abatimento de 278,00US\$/t de SO₂ removido (equivalente a 8,00US\$/MWh) para uma capacidade instalada de 400 MWe e a usina trabalhando com um fator de capacidade de 50%. Estes custos baixaram para 175,00US\$/t de SO₂ removido (equivalente a 4,50US\$/MWh) quando reduziu-se para 200 MW a capacidade da planta de dessulfuração.

PALAVRAS-CHAVES

Carvão, Combustão, Dessulfuração, Termoeletricidade, Poluição Atmosférica.

I. INTRODUÇÃO

O presente artigo contempla uma abordagem referente à implementação de ações mitigadoras junto à Usina Termoeletrica Presidente Médici - UPME, com o propósito de promover a redução das emissões de SO_x. Os dados e resultados aqui explorados fazem parte do projeto de pesquisa Modelagem da Dessulfuração para Termoeletricas a Carvão [1] que a Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC desenvolveu em parceria com a Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica - CGTEE.

Antes de iniciar a discussão do tema central ao qual nos propusemos analisar, é conveniente comentar e realizar determinadas considerações sobre a situação da termoeletricidade a carvão no país.

Atualmente, verifica-se que este setor está sendo submetido a forte pressão, pois não é nada simples passar de um sistema condominial de empresas estatais com mercados cativos e tarifas administradas, para outro de empresas independentes, em sua maioria de capital privado.

¹ Os autores trabalham no Departamento de Engenharia de Processos da Fundação de Ciência e Tecnologia - CIENTEC. (castellanjl@hotmail.com; davidchazan@hotmail.com; maluavila@cientec.rs.gov.br).

² Este artigo originou-se do projeto que integrou o Programa de P&D 2000/2001 da Companhia de Geração Térmica de Energia Elétrica - CGTEE, que o apoiou com recursos financeiros.

Assim, de um lado o governo pressiona o setor : com a liberação do mercado, deixando de assegurar a compra da EE das empresas geradoras; está em curso a extinção do mecanismo de otimização do sistema hidrotérmico nacional conhecido como CCC - Conta de Consumo de Combustíveis e, ao mesmo tempo, administra a elevação do respectivo Valor Normativo. De outra parte, os órgãos ambientais estabelecem padrões de emissões cada vez mais restritivos aos usuários de carvão mineral, por vezes - e o que é mais grave - a revelia dos padrões da qualidade do ar na região. Isto impõe sérias restrições ao setor e compromete a sua competitividade e a desejável expansão da termoeletricidade a carvão no sul do país, que é no mínimo estratégica e socialmente importante. A expansão da termoeletricidade nacional é de suma importância, haja vista que proporciona um maior balanceamento da matriz energética nacional, gera empregos, não contribui negativamente para o balanço das transações externas do país e reduz o risco de futuros racionamentos e "apagões", pois deixaríamos de estar a mercê do regime hidrológico - como nos encontramos hoje.

O que o setor almeja é que haja uma melhor harmonia entre os segmentos responsáveis pela administração do setor elétrico brasileiro e os responsáveis pela preservação ambiental, a fim de se evitar a imposição de custos de controle excessivos à nossa sociedade, em favor de um abatimento de poluição desnecessário, como freqüentemente ocorre quando se estabelecem padrões de emissões rigorosas em regiões com padrões de qualidade do ar bastante bons e ainda distantes dos padrões secundários. Ao se fazer esta advertência, o que se busca é não obrigar os empreendedores a incrementarem os custos de produção, imediatamente e de forma excessiva, que só se justificariam no futuro, quando a região estiver crescentemente ocupada por atividades poluidoras [2]. O importante é evitar o dilema "Desenvolvimento a qualquer preço x Proteção Ambiental a qualquer preço".

II. APRESENTAÇÃO

O estudo visou o atendimento dos seguintes objetivos globais:

- Realizar estudo técnico-econômico de alternativas de processos de dessulfuração aplicáveis em Térmicas a Carvão Pulverizado, visando à redução de emissões de enxofre em Usinas Brasileiras.

- Desenvolver modelo analítico capaz de identificar processos de dessulfuração com maior potencial de êxito para a redução das emissões de SOx e estabelecer o ranking das alternativas de dessulfuração mais promissoras para melhorar a qualidade do ar junto à planta da Usina Termoeletrica Presidente Médici - UPME.

No que se refere aos resultados e aos impactos setoriais e nacionais esperados, destacam-se os seguintes:

- Obtenção de modelo analítico capaz de priorizar tecnologias de dessulfuração, com maior potencial de êxito para Termoeletricas Brasileiras.
- Fornecer subsídios de cunho técnico e econômico para a implementação de ações mitigadoras referente às emissões de SOx em termoeletricas.
- Contribuir para a redução do impacto ambiental provocado pelas emissões de compostos sulfurados em usinas termoeletricas.
- Avaliação do impacto da dessulfuração nos custos de geração de energia elétrica em usinas térmicas a carvão.
- Gerar subsídios capazes de auxiliar órgãos governamentais responsáveis pela elaboração e/ou revisão de normas regulamentadoras e de políticas relacionadas à Termoeletricidade no Brasil.
- Ampliar a capacitação nacional na área de dessulfuração, em particular do pessoal da CIENTEC e da CGTEE.

III. DIAGNÓSTICO DA USINA DE CANDIOTA II

A. Usina Termoeletrica Presidente Médici

Atualmente, a UPME apresenta uma capacidade total instalada de 446 MWe, compreendendo quatro caldeiras que utilizam o carvão de Candiota e adotam a tecnologia de Combustão de Carvão Pulverizado. As principais características destas caldeiras que constituem as duas fases da usina de Candiota II são:

Fase A

- Capacidade : 2 x 63 MWe.
- Início de Operação: 1974.
- Duas Caldeiras com Queimadores Frontais.

Fase B

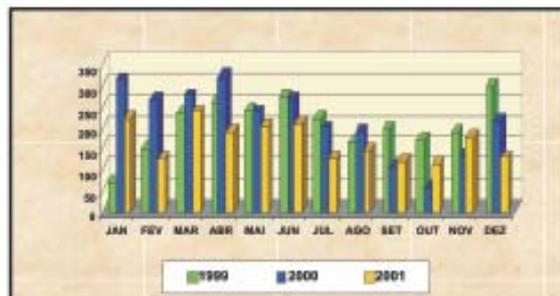
- Capacidade : 2 x 160 MWe.
- Início de Operação: 1986.
- Duas Caldeiras com Queimadores Tangenciais.

Outro fato relevante que impacta sobremaneira o desempenho das térmicas brasileiras, consiste no fato destas trabalharem na ponta do sistema nacional de geração de EE, com o propósito - nobre por sinal - de poupar recursos não-renováveis. Entretanto, este regime de operação reduz o Fator de Capacidade (FC), eleva os custos de geração e proporciona efeitos negativos tanto na eficiência energética quanto na eficiência dos processos de abatimento de poluentes.

A usina de Candiota II apresenta as seguintes características principais:

- Vida útil restante limitada, principalmente da Fase A;
- Rendimento modesto do ciclo térmico;
- Opera com baixo Fator de Capacidade médio, conforme demonstrado nos dados do Gráfico 1;
- Espaço limitado para instalação de planta de dessulfuração.

Está previsto um acréscimo significativo do parque termoeletrico movido a carvão mineral da região, a saber : Usina de Candiota III (350 MWe), da própria CGTEE e a Usina de SEIVAL (2 x 250 MWe).



B. Características do Carvão de Candiota

O carvão consumido pela UPME é fornecido pela CRM - Companhia Riograndense de Mineração, que é extraído da jazida de Candiota e depois de simples britagem é fornecido diretamente à referida usina. Portanto, o carvão consumido pelas caldeiras é run of mine e é suscetível a apresentar freqüentes oscilações nas suas características básicas, pois como sabe-se, estas características variam em função da camada de carvão e com a própria frente de mineração.

O carvão de Candiota apresenta as seguintes análises características médias:

Análise Elementar

Enxofre (%) bs	1,6
Nitrogênio (%) bs	0,7
Carbono (%) bs	32,7
Hidrogênio (%) bs	2,2
Oxigênio e outros (%) bs	8,8

Análise Imediata e Poder Calorífico

Umidade Total (%)	16,0
Cinzas (%) bs ³	54,0
Matéria Volátil (%) bs	20,0
Carbono.Fixo (%) bs	26,0
Poder Calorífico sup.(kcal/kg) bs	3.100

Para um teor de enxofre de 1,6% bs no carvão teremos uma emissão base de 7.000 mg SO₂/Nm³ de gás de combustão, referido a 6% de oxigênio.

O carvão de Candiota apresenta elevado teor específico de umidade e de enxofre, considerando seu baixo poder calorífico, além de apresentar características intrínsecas que inviabilizam o seu beneficiamento por processos convencionais [1].

C. Padrão de Emissão de SO₂ na UPME

Se persistir o estabelecimento de padrões de emissão da ordem daqueles estabelecidos pelo IBAMA no passado próximo recente[1], valor indicativo de 2.000 mg SO₂/Nm³ (700 ppm), será exigida a adoção de processo de dessulfuração com eficiência relativamente elevada. Assim, se considerarmos que hoje as caldeiras de Candiota II proporcionam uma emissão de SO₂ da ordem de 7.000 mg/Nm³, pode-se concluir que a eficiência de abatimento de enxofre deverá ser superior a 70%, para que aquele padrão de emissão seja atendido.

IV. AS TECNOLOGIAS DE DESSULFURAÇÃO

Considerando-se que a termoeletricidade deverá experimentar um crescimento significativo no país, pode-se afirmar que os limites das emissões de enxofre deverão tornar-se cada vez mais restritivos, e os geradores de energia elétrica devem decidir se: promovem a mudança da base tecnológica, através da adoção das chamadas Tecnologias Limpas, em substituição às caldeiras hoje existentes; reduzem o enxofre do combustível ou implantam tecnologias de dessulfuração nas termoeletricas "antigas".

As opções de controle aplicáveis para reduzir as emissões de enxofre na termoeletricidade e atender os padrões estabelecidos na legislação incluem:

1. Mudanças do combustível: visando à redução do teor de enxofre no combustível, seja através da implementação de ações na área de beneficiamento do carvão ou através da adoção de sistemas híbridos de combustão ou de geração de energia elétrica;
2. Introdução de tecnologias de dessulfuração do gás, durante ou após a combustão;
3. Adoção de tecnologias limpas de geração de energia elétrica, implicando a mudança da base tecnológica de geração de energia elétrica, através do emprego das tecnologias de combustão em leito fluidizado ou de gaseificação de carvão em ciclo combinado.

Para o caso específico da UPME, em particular da usina de Candiota II, a alternativa que contempla a introdução de

tecnologias de dessulfuração do gás, durante ou após a combustão, é a que apresenta maior atratividade para implementação de ações de curto prazo, visando a redução de emissões de SO_x. Esta afirmativa é fundamentada nos seguintes aspectos:

- a. O carvão de Candiota apresenta características intrínsecas que inviabilizam o seu beneficiamento pelos processos convencionais. Caso implementado, poderia ser caracterizado como predatório, por apresentar reduzido rendimento na fração mais nobre e com baixo enxofre. Além disto, a implementação desta ação para o caso específico promoverá o desperdício de recursos naturais e propiciará a ocorrência de danos ambientais de maiores proporções globais, pois causam impactos nos meios água e solo, além de onerar o preço do carvão e torná-lo mais escasso. Estes fatos, aliados a indisponibilidade de gás natural na região, que poderia substituir parte do carvão consumido nas caldeiras, praticamente eliminam a alternativa de mudança do combustível, que possibilitaria auferir uma redução sensível nas emissões de enxofre.
- b. Apesar da idade avançada das caldeiras de Candiota II, a mudança da base tecnológica - de carvão pulverizado para leito fluidizado, por exemplo - deve aguardar o agravamento da sua obsolescência e/ou competitividade. Logo, a alternativa adoção de tecnologias limpas de geração de energia elétrica, implicando a mudança da base tecnológica da UPME, assumirá importante papel - no que diz respeito ao tema dessulfuração - como uma ação de médio ou longo prazo. Portanto, esta alternativa não nos parece ser a de maior atratividade no momento atual, apesar dos ganhos potenciais em eficiência térmica e ambiental que oferece, pois exige investimento expressivo mesmo na hipótese de adequação das caldeiras atuais, que apresentam boas condições de gerar energia por um período relativamente longo, principalmente as caldeiras da Fase B, que possuem maior vida útil restante.

Os processos comerciais de dessulfuração, durante e após a combustão, aplicáveis nas termoeletricas a carvão pulverizado são normalmente classificados segundo as cinco categorias relacionadas na Tabela 1.

TABELA 1

Classificação das Tecnologias de Dessulfuração

PROCESSO	MATERIAL ABSORVENTE	SUBPRODUTO
LAVADORES		
Cal/Calcário	CaCO ₃ (calcário) / Ca(OH) ₂ , CaO (cal)	CaSO ₄ · 2H ₂ O (gesso) ou CaSO ₃ / CaSO ₄
Sódio	Na ₂ CO ₃ (soda barrilha), NaOH	Na ₂ SO ₃
Água do mar	Água do mar (+ Ca(OH) ₂)	Retorno ao mar
Amônia	NH ₃ (amônia)	(NH ₄) ₂ SO ₄
Duplo álcali	Na ₂ CO ₃ + CaCO ₃ (ou CaO)	Gesso, CaSO ₃ / CaSO ₄
SEMI-SECO	Ca(OH) ₂ (lama de cal)	CaSO ₃ / CaSO ₄
SECO		
Injeção na fomalha	CaCO ₃ , Ca(OH) ₂ , CaCO ₃ , MgCO ₃	CaSO ₃ / CaSO ₄
Injeção na linha de gás	Ca(OH) ₂ , CaO	CaSO ₃ / CaSO ₄
Híbrido	CaCO ₃ , Ca(OH) ₂	CaSO ₃ / CaSO ₄
Leito fluidizado	Ca(OH) ₂	CaSO ₃ / CaSO ₄
REGENERÁVEL	Na ⁺ SO ₃ / MgO / Aminas	SO ₂ , S, H ₂ SO ₄
COMBINADO		
NO _x / SO _x	NH ₃	(NH ₄) ₂ SO ₄ , NH ⁺ NO ₃

³ bs. base seca

A seleção das tecnologias de elevado potencial de aplicação na usina de Candiota II está fundamentada no seguinte elenco de considerações, que fez com que a maioria das alternativas relacionadas na Tabela I ficassem em segundo plano:

A seleção das tecnologias de elevado potencial de aplicação na usina de Candiota II está fundamentada no seguinte elenco de considerações, que fez com que a maioria das alternativas relacionadas na Tabela I ficassem em segundo plano:

As licenças ambientais expedidas por órgãos ambientais para a UPME apresentam incongruência. Uma delas estabeleceu padrões de emissão muito restritivos, somente alcançáveis pelas tecnologias que apresentam alta eficiência de abatimento de enxofre, e em outra oportunidade sugerem a adoção do processo de Injeção Direta de Calcário nas caldeiras, que como sabe-se é um processo que apresenta eficiência de dessulfuração relativamente baixa (<50%).

- A região de Candiota dispõe de importantes reservas de calcário. O calcário calcítico (40% CaO) é explorado e utilizado pelos dois fabricantes de cimento instalados na região e é mais escasso, enquanto que o calcário dolomítico (30% CaO) é bastante abundante na região e no Estado.
- Candiota está relativamente distante da costa marítima, reduzindo a priori a competitividade dos lavadores que utilizam água do mar como agente dessulfurante. A priorização desta alternativa poderá ser alterada caso a água do mar possa exercer outro papel de relevância ao referido pólo termoelétrico, como por exemplo, suprir necessidades para o arrefecimento dos ciclos térmicos, o que elevaria a escala de utilização da água do mar e poderia vir a viabilizar o empreendimento na região, onde a água é escassa.
- Existe uma tendência mundial de incrementar o emprego de amônia como agente de dessulfuração, principalmente onde é intensiva a exploração da agricultura (este é o caso do RS) - atividade altamente demandante de fertilizantes, como o sulfato de amônio que é o subproduto do referido processo. O Brasil importa amônia e sulfato de amônio, ambos de elevado preço no mercado. A experi-

ência internacional das tecnologias que utilizam amônia ainda é pequena e a competitividade destas está fortemente calcada no mercado e preço do subproduto, pois requerem investimentos cerca de 30% superiores aos processos que utilizam lavadores com calcário [1]. As usinas brasileiras SEIVAL do RS e a SUL CATARINENSE de SC deverão gerar mais de 500.000 t/a de sulfato de amônio e, sozinhas, deverão substituir cerca de 33% da quantidade hoje importada pelo país.

- Os processos regeneráveis apresentam custos muito elevados e somente são aplicáveis quando: a usina se localiza em zona de alta densidade demográfica, onde a circulação de grandes massas de matérias-primas e subprodutos é impraticável/inviável; existe mercado para os subprodutos comercializáveis e/ou quando os custos de disposição de rejeitos e subprodutos são tão elevados que justificam e viabilizam os elevados custos destes processos. Esta definitivamente não é a situação da UPME que está instalada numa região remota e relativamente distante de mercados demandantes por subprodutos comercializáveis.
- Os processos combinados assemelham-se aos regeneráveis e priorizam o abatimento conjunto das emissões de NO_x e SO_x . Considerando-se que a combustão da maioria dos carvões nacionais apresenta reduzido poder calorífico, conseqüentemente baixa temperatura de chama, via de regra as emissões de NO_x são tão baixas que dispensam qualquer iniciativa para a sua redução. Razão pela qual a seleção destes processos somente apresentará atratividade quando se fizer necessário o abatimento concomitante destes dois poluentes.

Na Tabela 2 são apresentadas as principais características típicas das diferentes categorias de processos de dessulfuração aqui apresentados.

Diante do exposto, selecionou-se cinco alternativas de processos de dessulfuração com maior potencial para atender as metas da CGTEE no que se refere a redução do SO_2 emitido pela usina de Candiota II. Logo, o aprofundamento do estudo técnico e econômico recaiu sobre as seguintes técnicas de dessulfuração:

- 1-Lavador com Calcário Calcítico.
- 2-Injeção Direta de Calcário Dolomítico na Fornalha.

TABELA 2
Características Típicas de Sistemas de Dessulfuração [1]

Característica	Lavadores	Semi-Seco	Seco (ID)	Regenerável
Combinado				
Eficiência DESOX (%)	90-98	75-90	50-60*	85-98
Investimento (US\$/KWe)	150-280	140-190	60-120*	190-380
Consumo de E Elétrica (%)	1-3	0,5-1	<0,5	<5
Subproduto Vendável	elevado	baixo	baixo	elevado
Espaço para Instalação	alto	moderado	baixo	alto
Consumo de Absorvente	baixo	moderado	alto	muito baixo

(*) Processo Híbrido e de Leito Fluidizado Circulante apresentam eficiências de até 75 e 90%, respectivamente.

- 3- Dessulfuração a Seco com Amônia.
- 4- Lavador com Amônia.
- 5- Dessulfurador Semi-Seco com Cal Dolomítica.

A seguir, são apresentadas as características das tecnologias alternativas de dessulfuração, que possuem elevado potencial de aplicação na Usina Termoelétrica Presidente Médici.

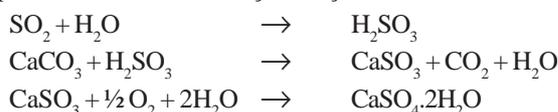
A. Dessulfuração de Gases por Via Úmida com Calcário

Em muitos países desenvolvidos, a tecnologia de dessulfuração por via úmida é um processo bastante adequado para a remoção de SO₂, predominando mundialmente a dessulfuração com calcário, tendo como subproduto o gesso. Esta escolha é explicada basicamente pela elevada confiabilidade e desempenho do processo calcário/gesso, além da alta disponibilidade de calcário e pelo mercado relativamente grande para a comercialização do gesso.

No processo convencional de dessulfuração por via úmida do gás de combustão com calcário, o lavador é instalado após o sistema de remoção de material particulado em filtros de mangas ou precipitador eletrostático. O gás é introduzido numa torre de absorção (dessulfurador) na qual é submetido a íntimo contato com a solução aquosa concentrada em cálcio. O SO_x do gás é retido na forma de sulfito e sulfato de cálcio, que são submetidos a desumidificação e seguem para sedimentação em espessador.

Uma variante do processo tradicional por via úmida é o chamado processo de dessulfuração com oxidação forçada. Neste processo, o sulfito de cálcio inicialmente formado é oxidado a sulfato de cálcio (gesso) através da injeção de ar diretamente na base do tanque da torre de dessulfuração. Devido a sua estrutura e dimensões maiores, os cristais de gesso decantam e liberam água mais facilmente que os cristais de sulfito, reduzindo consideravelmente o porte dos equipamentos de processamento dos subprodutos.

As reações parciais de absorção e oxidação do SO₂ no processo calcário/oxidação forçada são:



As principais características desta tecnologia de dessulfuração são:

- Os lavadores apresentam elevado desempenho e são usualmente projetados para eficiências de remoção na faixa de 90 a 95 %. Pela crescente confiabilidade que adquiriram ao longo de anos de utilização, a prática atual é a de dispensar o lavador adicional de reserva.
- Requer maior área para sua instalação e apresenta custo específico de investimento relativamente elevado.
- Requer baixo consumo de calcário (Ca/S 1,1).

- Não provoca qualquer alteração na rotina operacional, bem como no ciclo de manutenção da caldeira propriamente dita.
- A produção e a constituição das cinzas não será alterada. Entretanto, gerará cerca de 80 kg/MWh de sólidos, contendo elevado teor de gesso, o qual poderá ser comercializado para a indústria cimenteira/construção civil e contribuir para a redução dos custos operacionais da planta de dessulfuração por via úmida.
- Este processo é adequado ao emprego de calcário calcítico, que é mais escasso no RS, porém é extraído e utilizado na região.
- Há geração de efluente líquido e necessita de algum consumo adicional de água.
- Esta alternativa proporciona um abatimento bastante expressivo do material particulado remanescente no gás de combustão efluente dos precipitadores.

B. Processo Semi-Seco com Cal

Neste processo uma solução aquosa de cal hidratada é atomizada num vaso de absorção (dessulfurador) instalado na linha do gás de combustão, onde ocorre a reação do agente dessulfurante com o SO₂, evapora-se a água da solução dessulfurante resultando na formação de sulfato e sulfito de cálcio secos, que são abatidos em precipitador eletrostático ou filtro de mangas.

O processo pode contemplar a recirculação de sólidos com o propósito de reduzir o consumo específico do agente dessulfurante.

As reações fundamentais envolvidas neste processo são:



O incremento do uso deste processo depende do desenvolvimento de aplicações industriais da cinza modificada produzida. A adoção deste dessulfurador a jusante do precipitador eletrostático é comum na Europa para obter subprodutos distintos com maior potencial de comercialização, a saber: cinzas volantes e produtos sulfatados.

C. Processo Seco de Injeção Direta de Calcário na Fornalha

No processo de injeção direta na câmara de combustão da caldeira, calcário pulverizado é injetado na região superior da fornalha. A temperatura, o tempo de residência, a reatividade e as condições de distribuição do agente dessulfurante, além da granulometria e área específica do absorvente são fatores determinantes para o rendimento da dessulfuração, o qual não deve superar 50% quando emprega-se razão molar Ca/S da ordem de 2 (100% de excesso do agente dessulfurante). Este processo é muito dependente também da geometria e da carga da caldeira, pois estes exercem forte influência no perfil de temperatura e no tempo de residência do gás na caldeira, que são fatores determinantes para a taxa da reação de dessulfuração do gás de combustão.

As reações fundamentais envolvidas neste processo são:



Os processos de injeção direta são bastante recomendados quando processamos carvão com baixo enxofre e/ou quando dispomos de usinas térmicas de pequeno porte e que apresentam baixa disponibilidade de espaço.

As principais características desta tecnologia aplicada para o caso específico da UPME, são relacionadas abaixo:

- Apresenta baixa eficiência média de dessulfuração 45%. Espera-se que as caldeiras da Fase A apresentem rendimento da ordem de 50% e as da Fase B da ordem de 40%, pois as geometrias e os sistemas de queima são muito diferenciados.
- Aumento de aproximadamente 28% na geração global de cinzas, quando utilizado calcário calcítico. O acréscimo nas cinzas volantes deverá ser da ordem de 33% e a sua composição será alterada, pela incorporação de sulfato, sulfito e óxidos de cálcio, entre outros componentes decorrentes da adição de calcário. Isto poderá comprometer a comercialização das cinzas volantes modificadas ao setor cimenteiro. Este mercado, consumidor de parcela nada desprezível das cinzas de carvão, oportuniza uma destinação extremamente nobre às cinzas, pois minimiza o impacto destas sobre os meios solo e água, além de contribuir com alguma receita às usinas.
- A carga de material particulado, que circulará através das tubulações e equipamentos dispostos a jusante da câmara de combustão, será incrementada significativamente, podendo acelerar desgastes por abrasão. Por outro lado, reduzirá a corrosão atribuída ao SO_x e espera-se a elevação da eficiência de abatimento do MP [3], razão pela qual as emissões de particulados devem permanecer na mesma ordem de grandeza.
- As cinzas modificadas (volantes) deverão receber tratamento específico, pois apresentam maior atividade (óxido de cálcio livre, por exemplo) que as cinzas tradicionais.
- Este processo deverá elevar o consumo de energia térmica em até 3%, contribuindo para reduzir ainda mais a eficiência destas caldeiras.
- Necessita de espaço relativamente reduzido para a sua instalação e requer baixo investimento.
- A recirculação de sólidos, com o propósito de reduzir o consumo específico do agente dessulfurante ($\text{Ca}/\text{S} = 3$), não é passível de aplicação no caso, já que o carvão apresenta elevado teor de cinzas.
- O processo é muito adequado ao emprego do calcário dolomítico, bastante abundante no RS e de menor preço que o calcítico. Entretanto, o seu baixo teor de CaO exigirá um acréscimo da ordem de 30% no consumo de calcário.

D. Dessulfuração por Via Úmida com Amônia

Muitas das tentativas iniciais de dessulfuração com amônia nos anos 70 e 80 apresentaram problemas com relação às emissões de amônia e a formação de aerossol, produzindo a chamada pluma azul. Nos novos processos desenvolvidos nos anos 90, estes problemas foram minimizados através do controle e manutenção do pH em nível mais baixo, pela adoção da oxidação forçada in situ do líquido do lavador ou ainda pela utilização de precipitador eletrostático adaptado à eliminação de vapores. Este último dispositivo deve assegurar a eliminação da pluma azul removendo o aerossol formado quando se empregam carvões com elevado teor de enxofre e/ou cloreto.

Após a remoção de particulados, o gás quente é inicialmente enviado para um pré-lavador opcional onde entra em contato com uma solução saturada de sulfato de amônio através de fluxo concorrente. O gás é resfriado por saturação adiabática e, devido à evaporação de água da solução saturada, ocorre a cristalização do sulfato de amônio. Desta forma, o pré-lavador funciona como evaporador/cristalizador, no qual o calor do gás é efetivamente utilizado para a geração do sulfato de amônio.

O gás é então introduzido no absorvedor, onde o óxido de enxofre é removido do gás pelo contato com a solução diluída de sulfato de amônio que é reciclada aos atomizadores do dessulfurador. Na base deste tanque injeta-se a amônia e o ar necessário à formação do sulfato de amônio. O gás dessulfurado é tratado para eliminar névoas e aerossol e é então lançado para a atmosfera pela chaminé. Normalmente se faz necessário reaquecer o gás por técnicas tradicionais para manter uma boa dispersão das emissões.

O sucesso na lavagem de gases com amônia reside em evitar emissões de amônia e de aerossol pelo gás.

As reações presentes na absorção e oxidação de SO_2 com amônia podem ser expressas como segue:



O mecanismo que efetivamente ocorre é bem mais complexo envolvendo equilíbrios entre sulfito e bissulfito, bem como entre sulfato e bissulfato.

O sistema de dessulfuração com amônia requer a garantia do fornecimento de amônia, bem como do mercado para o sulfato de amônio, que são commodities no mercado mundial e de preços elevados.

E. Dessulfuração a Seco com Amônia - Processo EBA

O processo EBA (Eletron Beam with Ammonia) é uma tecnologia inovadora de controle da poluição do ar a seco que, através da injeção de amônia e irradiação de feixe de elétrons, promove eficiente remoção dos óxidos de enxofre e de nitrogênio do gás de combustão. Estes contaminantes, além de ácido clorídrico gasoso são convertidos em subproduto sólido, constituído principalmente de sulfato e nitrato de amônio que são empregados na agricultura.

O processo EBA, que opera a seco, consiste de três etapas principais:

- arrefecimento do gás de combustão.
- injeção de amônia e irradiação de feixe de elétrons.
- abatimento e beneficiamento dos subprodutos nitrogenados gerados.

Após a remoção da cinza volante em precipitadores eletrostáticos, o gás de combustão bruto é umidificado e sofre um arrefecimento, atingindo temperaturas na faixa de 60-65°C. Este gás, após sofrer injeção de amônia, passa ao compartimento de reação, sendo submetido à irradiação de feixe de elétrons. O produto seco granulado é obtido de reação de amônia com os diversos gases ácidos e é abatido em um precipitador eletrostático.

As reações que ocorrem no compartimento de reação, todas completadas em segundos, são classificadas como "induzidas por feixes de elétrons".

As vantagens principais do processo EBA, frente aos processos combinados, são:

- Remoção eficiente e simultânea de SO₂, SO₃ e NO_x e de qualquer gás ácido presente, incluindo HCl, em uma única operação;
- Baixa opacidade na emissão da chaminé;
- Facilidade de operação com sistema simplificado de ligar e desligar;
- Operação a seco, evitando a geração de efluente líquido;
- Subproduto com valor comercial para emprego como fertilizante.

As principais desvantagens deste processo são:

- Custos elevados em unidades que não requerem redução de NO_x;
- Energia requerida relativamente elevada para a geração do feixe de elétrons, exigindo transformadores potentes;
- Manutenção especializada e dependente de importação, logo onerosa;
- Remoção de enxofre limitada em 94%.

V. ESTUDO TÉCNICO-ECONÔMICO

Os custos de capital e de operação de uma planta de dessulfuração são influenciados por fatores relacionados à localização da Usina.

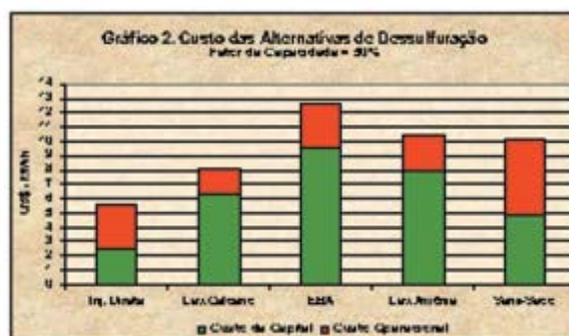
Os custos de capital são consideravelmente influenciados pelas condições mercadológicas e outros fatores, tais como: impostos, custos financeiros, localização geográfica e grau de complexidade e intensidade de trabalho requerido para preparação da área necessária para sua instalação. De outra parte, estes custos também dependem de fatores técnicos, tais como os elencados abaixo:

- Concentração de SO₂ no gás de combustão.
- Eficiência de dessulfuração requerida.
- Volume de gás que será tratado (eficiência do ciclo térmico).
- Qualidade dos subprodutos gerados.
- Grau de confiabilidade e redundância requerida para equipamentos.

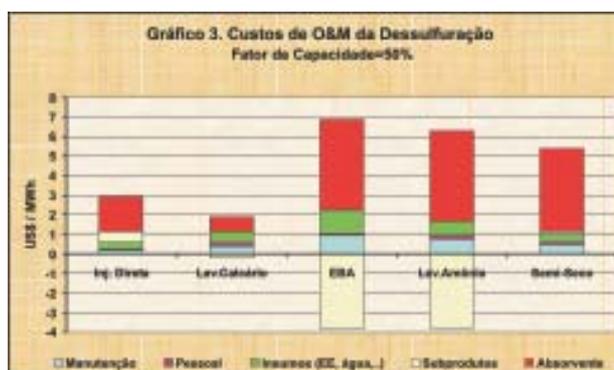
- Capacidade da planta.
- Vida útil da Instalação.
- Outras exigências ambientais, relacionadas à disposição de efluentes e rejeitos e à necessidade de reaquecimento do gás.

Os custos operacionais dependem dos custos do absorvente, de disposição de efluentes e rejeitos ou dos preços de comercialização dos subprodutos, todos influenciados por condições locais. Os custos variáveis de operação são proporcionais à quantidade removida de SO₂ e os de disposição de subprodutos assumem valor negativo quando são comercializáveis. Estes custos são fortemente influenciados pela localização da planta.

Para a realização da análise das cinco alternativas selecionadas, produzimos os Gráficos 2 e 3, a partir do modelo desenvolvido[1]. Nestes se pode visualizar o impacto da Dessulfuração nos custos de geração de energia elétrica (EE), para o Caso A - Plantas de Dessulfuração com capacidade instalada de 400 MW, para atender uma produção de energia correspondente a 50% da capacidade instalada na Usina de Candiota II.



Na Tabela 3 são apresentadas os dados mais relevantes das alternativas que compreenderam este estudo e proporcionaram a produção dos Gráficos 2 e 3. Estes dados são referenciados para uma capacidade de geração de EE de 223 MWh, correspondendo a um fator de capacidade de 50% para a UPME. Como se vê claramente, a alternativa Lavador com Calcário é a que implica menores custos de abatimento dentre as alternativas que reduzem 90% da carga poluidora. Ela é, inclusive, mais barata do que a alternativa que abate 80%. Só não é mais barata do que a alternativa Injeção Direta de Calcário, mas esta abate apenas a metade do SO₂ emitido. Logo, a alternativa Lavador com Calcário é a mais atraente.



O Gráfico 2 nos mostra que o processo de Injeção Direta de Calcário é o de menor custo. Entretanto, se con-

siderarmos também os benefícios ambientais das diferentes alternativas, pode-se verificar que a alternativa mais atrativa é revelada pelo processo de Lavagem do Gás com Calcário, ver Tabela 3. O custo específico, expresso por US\$ / t de SO₂ abatido, explicitado nesta tabela, é um parâmetro mais apropriado para adotar-se como critério para o estabelecimento do ranking das tecnologias de dessulfuração, uma vez que contempla a eficiência de abatimento de enxofre.

Portanto, pode-se afirmar que a ordem decrescente de atratividade das tecnologias estudadas para o caso específico da UPME é o seguinte:

1. Lavador com Calcário - US\$ 278 / t SO₂ removido.
2. Lavador com Amônia - US\$ 362 / t SO₂ removido.
3. Injeção Direta de Calcário - US\$ 381 / t SO₂ removido.
4. Processo Semi-Seco com Cal - US\$ 396 / t SO₂ removido.
5. Processo Seco com Amônia - EBA - US\$ 437 / t SO₂ removido.

O Gráfico 3 mostra que os processos que usam amônia apresentam custos de O&M (operação e manutenção) bastante sensíveis à comercialização do subproduto.

O acréscimo dos custos de geração de EE proporcionados pelas alternativas de dessulfuração de melhor desempenho ambiental (reduzida emissão de SO₂), são superiores a US\$ 8,00 / MWh. Este custo representará um acréscimo superior a 32% do preço máximo de venda de EE (Valor Normativo estabelecido pela ANEEL) para as distribuidoras, que é da ordem de US\$ 25,00 para o caso de Termoelétricas movidas a carvão. Este fato é praticamente insustentável para a realidade brasileira, onde o preço da EE ainda é relativamente baixo se confrontado com aqueles praticados nos países mais desenvolvidos - população com maior poder aquisitivo e onde a qualidade do ar está muito mais comprometida devido à elevada taxa de emissão de poluentes.

Outrossim, a Usina Termoelétrica Presidente Médici, bem como as demais térmicas brasileiras, trabalha com baixo fator de capacidade médio anual (ver Gráfico 1), como consequência da predominância da Hidroeletricidade no sistema interligado brasileiro, fazendo com que o Operador

Nacional do Sistema Elétrico demande maior produção das Térmicas somente quando se faz necessário recuperar ou manter o nível de água desejado nos reservatórios das hidroelétricas.

Este fato sugere que a melhor relação custo-efetividade será auferida na situação em que a capacidade da planta de dessulfuração da UPME se aproximar da sua capacidade média de geração de EE. Isto proporcionará a obtenção de um abatimento bastante bom de poluição atmosférica a um custo bem mais suportável pela sociedade brasileira, conforme dados explicitados no Gráfico 4. Neste gráfico, são apresentados os custos das diferentes alternativas para uma planta com capacidade para tratar o gás de combustão equivalente a produção de 200 MWh - Caso B. Cabe ressaltar que os custos da Injeção Direta de Calcário, por ser um processo de dessulfuração que ocorre durante a combustão, não se beneficiará desta estratégia.



A única desvantagem do Caso B (plantas de dessulfuração com capacidade de 200 MW), consiste no fato de que as emissões de SO₂ serão maiores que as observadas no Caso A (plantas de dessulfuração com capacidade de 400 MW) sempre que a geração de EE superar a capacidade instalada da planta de dessulfuração. Entretanto, esta desvantagem será atenuada em parte, pois sabe-se que a maior demanda de EE de origem Térmica (nível d'água baixo nos reservatórios das hidroelétricas) se verifica justamente durante a primavera e o verão, oca-

TABELA 3
Alternativas de Dessulfuração para a Upme - Fc 50% - Caso A

Parâmetro \ Alternativa	1. Lav. Calcário	2. Lav. Amônia	3. Inj. Direta	4. Semi-Seco	5. EBA
Absorvente	Calcário Calcítico	Amônia	Calcário Dolomítico	Cal Dolomítica	Amônia
Capacidade Instalada (MWe)	400	400	400	400	400
Investimento (milhões US\$)	80	100	32	60	120
Eficiência DESOX (%)	90	90	45	80	90
Custo da Dessulfuração (US\$/MWh)	8,00	10,40	5,50	10,10	12,60
(US\$/t SO ₂ removido)	278,00	362,00	381,00	396,00	437,00
SO ₂ Capturado (t/a)	56.000	56.000	28.000	50.000	56.000
Consumo de Absorvente (t/a)	144.000	30.200	547.000	207.000	30.200
Emissão de SO ₂ (mg/Nm ³)	700	700	3.900	1.400	700
Emissão de MP (mg/Nm ³)	<100	<100	<1.000	<100	<100

ção em que as condições climáticas favorecem a dispersão de poluentes na atmosfera, fazendo com que o agravamento da qualidade do ar não guarde a mesma proporção de crescimento das emissões.

Na Tabela 4 são apresentados os dados mais importantes que o modelo desenvolvido forneceu para o Caso B. Conforme se pode verificar, as vantagens em termos de redução dos custos superam em muito as desvantagens com o pequeno incremento verificado nas respectivas emissões.

VII. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Conforme demonstrado na seção anterior, as tecnologias de dessulfuração que empregam Lavadores, foram as mais atrativas para o caso específico da Usina Termoelétrica Presidente Médici. É importante registrar que estas tecnologias também oportunizam relevante abatimento do material particulado presente no gás de combustível, ver dados nas Tabelas 3 e 4.

A alternativa Lavador com Calcário é a que mais se destacou e apresentou a melhor relação custo-efetividade, tanto para o Caso A como para o Caso B estudados.

Isto posto, e levando-se em consideração que o Caso B oferece vantagens significativas em termos de acrésci-

mo mais modesto nos custos da EE gerada (4,50 contra 8,00 US\$/MWh), e que necessita menor área para a sua instalação, pode-se concluir que a implantação de uma unidade de dessulfuração com capacidade de 200 MW, empregando a tecnologia de lavagem do gás de combustível com calcário, é a melhor alternativa recomendada para a referida usina.

VIII. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as contribuições de V. F. Reichelt, E. M. Cánepa, M. J. S. Soares, J. Katzap, A. C. O. Sarmiento, J. R. Santana da CIENTEC e de F. N. M. Porto, A. D. Siqueira, L. A. R. Mousquer da CGTEE.

IX. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] J. L. Castellan, D. T. Chazan, M. L. d'Ávila "Modelagem da Dessulfuração para Termoelétricas a Carvão", CIENTEC, Porto Alegre, RS - Relatório Técnico, p. 46, out. 2002.
- [2] J. L. Castellan, E. M. Cánepa, J. C. C. Cunha, - "A Legislação Ambiental e a Competitividade de Termoelétricas a Carvão no Brasil" - CIENTEC, Porto Alegre, RS, dez. 1997.
- [3] D. T. Chazan, M. L. d'Ávila, J. L. Castellan, Projeto "Estudo e Avaliação da Dessulfuração Direta com Calcário em Caldeira Termoelétrica com Carvão Pulverizado" CIENTEC, Porto Alegre, RS - Relatório Técnico, p. 46, fev. 2002.

TABELA 4

Alternativas de Dessulfuração para a Upme - Fc 50% - Caso B

Parâmetro \ Alternativa	1. Lav. Calcário	2. Lav. Amônia	3. Inj. Direta	4. Semi-Seco	5. EBA
Absorvente	Calcário Calcítico	Amônia	Calcário Dolomítico	Cal Dolomítica	Amônia
Capacidade Instalada (MWe)	200	200	400*	200	200
Investimento (milhões US\$)	40	50	32	30	60
Eficiência DESOX (%)	81	81	45	72	81
Custo da Dessulfuração (US\$/MWh)	4,50	5,90	5,50	7,00	7,20
(US\$/t de SO ₂ removido)	175,00	229,00	381,00	306,00	277,00
SO ₂ Capturado (t/a)	50.400	50.400	28.000	44.800	50.400
Consumo de Absorvente (t/a)	129.000	27.000	547.000	185.000	27.000
Emissão de SO ₂ (mg/Nm ³)	1.350	1.350	3.900	2.000	1.350
Emissão de MP (mg/Nm ³)	<170	<170	<1.000	<170	<170

(*) Esta opção deve ser instalada em todas as caldeiras, não permitindo a redução da sua capacidade.