

## **Comparação do Desempenho Ambiental de Alternativas Sustentáveis para a Geração Elétrica na Produção de Fertilizantes**

Luiz Alexandre Kulay - luiz.akulay@sp.senac.br - Centro Universitário SENAC

Edson Carvalho Rocha Junior - edson.rocha@bunge.com - Centro Universitário SENAC

### **Resumo**

O presente estudo se propôs a analisar o desempenho ambiental de cenários potenciais de geração de energia elétrica empregados pela indústria nacional de fertilizantes, em especial, no tocante à obtenção de superfosfato simples SSP. Os cenários considerados compreenderam energia química da fusão de enxofre elementar, a combustão de gás natural e a aquisição de eletricidade junto à rede concessionária. cenários energéticos antes descritos. Para a comparação foram examinadas unicamente as emissões atmosféricas geradas em cada situação. O desempenho da energia de origem hidrelétrica fosse superior em termos de emissão de CO<sub>2</sub> e de SO<sub>2</sub> que àqueles apresentados pelas alternativas concorrentes. No entanto, dessas últimas não decorrem emissões de certos poluentes, tais como CO e N<sub>2</sub>O encontrados na hidroeletricidade.

Palavras-chave: Fertilizantes Fosfatados, Superfosfato Simples, Cogeração, Energia Elétrica

### **Introdução**

O fósforo desempenha papel preponderante no crescimento de muitas plantas, motivo pelo qual a aplicação industrial regular deste elemento se dá na produção de fertilizantes. Registros estatísticos realizados pela Associação Nacional para Difusão de Adubos - ANDA [1] dão conta que em 2005, foram consumidos no Brasil cerca de 10,5 milhões de toneladas de adubos fosfatados, desempenho condizente com a expressividade do setor agrícola do país.

Dentre as variedades que integram tal classe de fertilizantes, deve merecer destaque o superfosfato simples - SSP. Com teor de fósforo da ordem de 20%, sua produção no parque industrial brasileiro excedeu os 4,7 milhões de toneladas no último ano.

Quanto à tecnologia de produção, a totalidade do SSP brasileiro é obtida por meio da chamada rota sulfúrica, pela qual rocha fosfática – constituído em essência por fluorapatita, Ca<sub>10</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>6</sub>F<sub>2</sub> – será transformado para uma forma assimilável pelos vegetais por meio de digestão com ácido sulfúrico - H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> sob condições controladas. Tal transformação ocorre em uma unidade constituída de misturador de elevada intensidade e reator do tipo correio, que opera em regime contínuo de processamento.

A decomposição da apatita por H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> acontece em duas etapas. Na primeira, o ataque ácido do mineral gera ácido fosfórico, sulfato de cálcio – geralmente hemi-hidratado – além de ácido fluorídrico - HF. Esta reação é rápida, e dela resulta uma suspensão cuja temperatura é da ordem de 125°C. O produto é então vertido sobre o reator do tipo correia, condição em que se processa a segunda etapa de reação. O ácido fosfórico ataca a parcela de apatita não reagida formando fosfato monocálcico e uma quantidade adicional de HF, em uma reação, ao cabo da qual a suspensão formada começa a se solidificar. Após a acidulação o SSP é conduzido à cura, onde as reações de solubilização da apatita se completam.

A produção de uma tonelada de SSP consome em média 410 MJ de energia, supridos na maioria dos casos, via cogeração com ciclo combinado a vapor, este último, proveniente da produção de ácido sulfúrico por enxofre elementar, um processo tipicamente exotérmico. No entanto, em situações de parada, incidental ou programada, desta instalação, a cogeração de eletricidade é sustentada pela a queima de gás natural – ou óleo diesel – em caldeira de força.

Para situações em que a turbina de geração de energia torna-se inoperante, o funcionamento ordinário da planta de SSP é garantido pela rede elétrica. Ainda que o processo para seleção da alternativa mais adequada ao atendimento das necessidades elétricas da produção de SSP observe critérios de cunho operacional, econômico, e até logístico, a adoção de qualquer das opções antes indicadas irá provocar, fatalmente, desdobramentos sobre o meio ambiente.

Dado esse contexto, o presente estudo se propõe a analisar o desempenho ambiental dos cenários energéticos antes descritos. Para tanto, serão consideradas, em primeira instância, unicamente as emissões atmosféricas geradas em cada situação. Da mesma forma, espera-se que estes levantamentos permitam realizar a hierarquização das mesmas alternativas segundo um critério ambiental tecnicamente fundamentado.

## Metodologia

A obtenção de 1000 kg SSP por meio de rotas processuais do tipo Kulmann, Broadfiel, ou suas variação – todas estas tecnologias de uso regular por parte da indústria brasileira para a produção de fertilizantes fosfatados – depreende um consumo de energia elétrica da ordem de 410MJ [2].

Tal demanda é em geral suprida por sistema de cogeração do tipo ciclo combinado com turbina a vapor aproveitando, para tanto, energia térmica existente na própria instalação fabril. Uma fonte regular de obtenção de energia térmica consiste da unidade de produção de  $H_2SO_4$ , caso tal processamento ocorra a partir de enxofre elementar. Para situações nas quais o  $H_2SO_4$  não proceda desta matéria-prima a energia térmica pode ser providenciada pela geração de vapor via queima de gás natural. Alternativamente, nos casos em que a unidade de cogeração esteja indisponível, ou simplesmente não exista, a necessidade energética para a produção de SSP pode ser suportada pela rede elétrica.

A cogeração de energia por ciclo combinado depreende o uso de turbina elétrica, cujo rendimento na transposição de energia térmica em elétrica é da ordem de 60%, fato que eleva a 683MJ a quantidade de vapor a ser subministrado ao equipamento em qualquer dos cenários anteriormente apresentados nos quais esta tecnologia seja considerada.

A produção de  $H_2SO_4$  a partir de S elementar – alternativa denominada doravante como Cenário I – gera entre 1,0 e 1,2 t de vapor para cada tonelada de ácido produzido. Tal vapor é decorrente da recuperação do calor originado nas etapas de fusão de S, produção de dióxido de enxofre –  $SO_2$ , e de sua conversão a trióxido de enxofre –  $SO_3$ , intermediárias do processo. Quanto as propriedade de estado no momento em que deixa a unidade de produção de  $H_2SO_4$ , este se encontra superaquecido a 400°C e 4,0MPa, ou seja, com uma total de 3213,6 kJ/kg [3].

Após passar pela turbina onde grande parte do calor é cedido, o vapor passa a dispor de um conteúdo energético de 2799,5 kJ/kg resultante do estado saturado seco à temperatura de 255°C e mesma pressão de entrada (4,0MPa) em que se encontra.

Esse quadro permite projetar uma necessidade de produção de 1,5t de  $H_2SO_4$  para as quais, deverão ser emitidos 3,91kg de  $SO_2$  e 0,071kg de  $SO_3$ , nos casos para os quais esse processamento ocorrer por meio da tecnologia de Dupla Absorção e Duplo Contato – DA/DC, uma prática usual na quase totalidade das plantas brasileiras do gênero [4].

Condições semelhantes balizam o Cenário II no qual o vapor considerado como fonte de energia térmica procede da combustão de gás natural em caldeira de força. Para efeito desta avaliação, considerou-se a composição do gás natural adquirido pelo país junto à Bolívia, cuja composição aparece na Tabela 1 abaixo indicada [5], da qual resulta para o Poder Calorífico Superior – PCS, o valor de 43,95MJ/kg de gás.

Tomando-se por hipótese para o caso presente que as quantidades e condições de estado do vapor que deixa a caldeira devam ser idênticas àquelas já detalhadas para o Cenário I, bem como, que a transformação dos hidrocarbonetos constituintes do gás natural em dióxido de carbono se dê por meio de combustão completa, é possível estimar que para suprir a demanda energética da produção de 1,0 t SSP sejam emitidos 379kg de CO<sub>2</sub>.

Analogamente, dada a presença ainda que residual de nitrogênio N<sub>2</sub> no combustível, e supondo-se uma taxa de 25% de transformação deste composto á uma forma oxidada graças às condições extremas em que a combustão ocorre [6], deve também ser atribuída à mesma alternativa tecnológica uma emissão de 0,89kg NO<sub>2</sub>.

Tabela 1 - Composição do Gás natural – Gasoduto Bolívia-Brasil

Espécie Química	%Molar
O <sub>2</sub> (Oxigênio)	0,000
N <sub>2</sub> (Nitrogênio)	0,781
CO <sub>2</sub> (Dióxido de Carbono)	1,446
C <sub>1</sub> (Metano)	88,045
C <sub>2</sub> (Etano)	6,682
C <sub>3</sub> (Propano)	1,905
i-C <sub>4</sub> (Iso-Butano)	0,288
n-C <sub>4</sub> (Normal-Butano)	0,457
i-C <sub>5</sub> (Iso-Pentano)	0,142
n-C <sub>5</sub> (Normal-Pentano)	0,111
C <sub>6</sub> + (Hexano e Superiores)	0,143

Fonte: Adaptado de [5]

No Cenário III o suprimento da energia necessária à produção de SSP é proveniente de uma ou mais concessionárias que operam no setor elétrico nacional. Das fontes gerenciadas por essas agências aquela de origem hidrelétrica segue tendo um volume significativamente maior de contribuição, da ordem de 88%, muito embora nos últimos cinco anos tenha crescido de maneira expressiva a contribuição de energia de origem termelétrica no país [7].

Tal preâmbulo faz-se necessário na medida em que a elaboração do presente estudo tomou por premissas: que a energia elétrica a ser considerada para efeito de comparação com as demais alternativas de fornecimento desse bem seria aquela de origem hidrelétrica; e, que o modelo de geração selecionado para efeito de avaliação de emissões atmosférica compreende a Usina de Itaipu, pelo fato desta responde individualmente por 22,4% de todo o consumo nacional na atualidade [7].

A Tabela 2 traz valores de emissão para diversos poluentes, tanto na construção, como durante a operação desse empreendimento, calculados para a produção de 1MW de energia. Ao serem convertidos a unidades mais adequadas, os 410MJ/ t SSP representam 0,114MW de energia.

Finalmente, é importante evidenciar o uso de um modelo linearizado para expressar as emissões atmosféricas relacionadas ao consumo de energia da produção de 1 t de SSP a partir daqueles calculados para 1 MW.

Tabela 2 – Perfil parcial de Emissões Atmosféricas da Usina de Itaipu

Poluente	Construção (kg/MWh)	Operação (kg/MWh)	Total (kg/MWh)	Total Ajustado (kg/t SSP)
CO <sub>2</sub> (Dióxido de Carbono)	0,45	1,12	1,56	0,18
CO (Monóxido de Carbono)	0,071	0,041	0,11	0,013
NO <sub>x</sub> (Óxidos de Nitrogênio)	0,0027	0,00027	0,003	0,0003
NO <sub>2</sub> (Dióxido de Nitrogênio)	0,000012	0,000003	0,00002	0,00000002
N <sub>2</sub> O (Óxido Nitroso)	0,0000006	0,000000012	0,0000006	0,00000007
SO <sub>2</sub> (Dióxido de Enxofre)	0,002	0,0016	0,004	0,0004
SO <sub>x</sub> (Óxidos de Enxofre)	0,00025	0,00002	0,0003	0,00003

Fonte: Adaptado de [7]

## Resultados

O produto dos cálculos indicados na seção de Metodologia é apresentado a seguir na Tabela 3.

Tabela 3 – Comparação de Alternativas para o Suprimento de Energia Elétrica na produção de SSP

Poluente	Cenário I (kg/t fertilizante)	Cenário II (kg/t fertilizante)	Cenário III (kg/t fertilizante)
CO <sub>2</sub> (Dióxido de Carbono)	-	379	0,18
CO (Monóxido de Carbono)	-	-	0,013
NO <sub>x</sub> (Óxidos de Nitrogênio)	-	-	0,0003
NO <sub>2</sub> (Dióxido de Nitrogênio)	-	0,89	0,00000002
N <sub>2</sub> O (Óxido Nitroso)	-	-	0,00000007
SO <sub>2</sub> (Dióxido de Enxofre)	3,91	-	0,0004
SO <sub>x</sub> (Óxidos de Enxofre)	0,071	-	0,00003

É bastante oportuno apontar que tais resultados se ativeram exclusivamente os rejeitos atmosféricos decorrentes de tecnologias – caso da comparação entre ciclo combinado com turbina a vapor e energia hidrelétrica – e de insumos – energia de origem química da produção de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> e da combustão do gás natural – compreendidos nos cenários em estudo.

Assim sendo, estão excluídos desses totais valores de gerações oriundos da construção de equipamentos e demais bens de capital, excetuando-se a Usina de Itaipu. A inclusão desse empreendimento, baseia-se no fato de a usina estar intrinsecamente relacionada ao processo de geração de eletricidade, em virtude de suas natureza e características.

## Discussão e Conclusões

A análise dos dados apresentados pela Tabela 3 poderia em primeira instância revelar grande disparidade entre os valores das emissões atmosféricas geradas para cada cenário, fato que tornaria dificultoso o processo de hierarquização das mesmas alternativas. No entanto, um

exame mais detido de tais resultados, realizado de maneira discreta permite fornecer substrato para a ordenação das presentes tecnologias.

Muito embora dentre os constituintes da classe dos combustíveis fósseis o gás natural seja considerado como dos menos impactantes ao meio ambiente, sua aplicação para efeito de geração de energia elétrica nas condições estabelecidas pelo Cenário II mostrou desempenho bastante aquém daquele alcançado pela outra possibilidade sob análise, Cenário III, no tocante à emissão de CO<sub>2</sub>. Mesmo que o processo de decomposição orgânica da área inundada pelo lago seja o maior contribuinte para geração desse poluente na alternativa que considera como fonte primária a hidroeletricidade, o consumo e a composição do gás natural acabaram por ser determinantes nesse caso.

Essa mesma situação se repete para o caso do dióxido de nitrogênio. A contribuição propiciada pelo Cenário III, originada de diversas procedências de incidência, em sua maioria, ao longo da construção, é da ordem de 20µg/t SSP. Por outra parte, as condições exaustivas em que ocorre a queima do gás natural – sobretudo no tocante à temperatura e ao escoamento durante esse processo, fazem com que o resultado de 890g NO<sub>2</sub>/t SSP demonstrado pelo Cenário II, embora considerado aceitável indique uma vez mais o pior desempenho ambiental.

No tocante às emissões de gases sulfurados, o Cenário I mostrou-se mais impactante que o Cenário III. Ainda que para o desenvolvimento dessa avaliação considerasse o processo DA/DC de produção de ácido sulfúrico, tido como melhor tecnologia disponível no momento, 3,91kgSO<sub>2</sub> e 71g de SO<sub>x</sub> – em sua maior parte formada por névoas de SO<sub>3</sub> – gerados para cada tonelada produzida de SSP superam em muito aos índices alcançados pela energia de fonte hidroelétrica.

Em contraposição a esses tais resultados coloque-se, no entanto, o fato de a geração de eletricidade pela rota da recuperação do calor oriundo da fusão do enxofre ser uma prática de conservação de energia.

Finalmente, muito embora o Cenário III apresentasse melhor desempenho em termos de emissões atmosféricas que o de seus concorrentes, apenas nessa alternativa observou-se as emissões de CO, de derivados nitrogenados como N<sub>2</sub>O e outros, aqui representados por NO<sub>x</sub>.

## Referências

[1] ASSOCIAÇÃO NACIONAL PARA A DIFUSÃO DE ADUBOS. Anuário estatístico do setor de fertilizantes. São Paulo, ANDA, 2005. 154 p.

[2] KULAY, L. Desenvolvimento de um modelo de Análise de Ciclo de Vida adequado às condições brasileiras – aplicação ao caso d superfosfato simples. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica / EPUSP, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2000, 143 fls.

[3] BRUNO, M.A.C., ed. Conservação de energia na indústria de fertilizantes: manual de recomendações. São Paulo, IPT, 1985. 487 p. (Publicações IPT, n. 1632).

[4] DWECK, J. Reciclagem de rejeitos sólidos industriais: desenvolvimento de uma rota, em escala de laboratório para a recuperação de compostos a partir de um rejeito da produção de ácido sulfúrico. Tese de Doutorado, Escola Politécnica / EPUSP, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 1990, 187 fls.

[5] COMGÁS – Relatório Anual 2005 – endereço: <http://www.comgas.com.br> acessando em 25/09/2006

[6] KULAY, L. Uso da Análise de Ciclo de Vida para a comparação do desempenho ambiental das rotas úmida e térmica de produção de fertilizantes fosfatados. Tese de Doutorado, Escola Politécnica / EPUSP, Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2004, 314fls.

[7] RIBEIRO, F.M. Inventário de ciclo de vida da geração hidrelétrica no Brasil - Usina de Itaipu: primeira aproximação" Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação Inter-unidades em Gestão Energética / PIPGE Universidade de São Paulo – USP, São Paulo, 2004, 485 fls.

**Contato**

Luiz Alexandre Kulay

Centro Universitário SENAC - Programa de Pós-Graduação em Gestão Integrada em  
Saúde do Trabalho e Meio Ambiente

Av. Engenheiro Eusébio Stevaux, 823 –CEP: 04696-000 – São Paulo – SP – Brasil

Telefone: (11) 5682-7529 – Fax: (11) 5682.7439