



**SNPTEE  
SEMINÁRIO NACIONAL  
DE PRODUÇÃO E  
TRANSMISSÃO DE  
ENERGIA ELÉTRICA**

GPT - 04  
16 a 21 Outubro de 2005  
Curitiba - Paraná

**GRUPO II  
GRUPO DE ESTUDO DE PRODUÇÃO TÉRMICA E FONTES NÃO CONVENCIONAIS - GPT**

**BENEFÍCIOS DA ADOÇÃO DA TECNOLOGIA DE QUEIMA DE CARVÃO MINERAL DO PARANÁ EM LEITO FLUIDIZADO COMPARADA A TECNOLOGIA DE QUEIMA DE CARVÃO PULVERIZADO CONVENCIONAL**

**Waldir Sampaio\***

**Emílio Edson Costa**

**COPEL GERAÇÃO**

**Sulconsult**

**RESUMO**

O Paraná contém em seu subsolo reservas de carvão mineral que pelas suas características, tornam-no atrativo como combustível para a geração de energia termelétrica, porém tal insumo apresenta certas restrições com relação a determinados subprodutos resultantes de sua queima, como cinzas e gases de enxofre, os quais causam impactos ambientais que devem ser controlados por uma tecnologia adequada a se ter níveis de emissões toleráveis por lei. Assim sendo, propõem-se à tecnologia de queima em leito fluidizado circulante como uma alternativa mais eficiente em relação a outro processo de queima e a possibilidade de uso de suas cinzas.

**PALAVRAS-CHAVE**

Leito-fluidizado, combustão, carvão, cinzas, dessulfurização.

**1.0 - INTRODUÇÃO**

A região sul do Brasil é caracterizada por uma diversidade de atividades desenvolvidas para a produção de bens de capitais, dentre elas destaca-se a geração de energia elétrica que é obtida a partir de várias fontes da natureza, e são convencionalmente divididas em:

- a) Hidráulica;
- b) Petróleo, gás natural, carvão mineral, turfa e xisto – não renováveis;
- c) Biomassa, eólica, solar, marés, geotérmica e outras - renováveis.

Apesar de ser questionada, a energia não renovável é hoje a mais utilizada no mundo, através do petróleo, do carvão mineral, do gás natural e outros, uma vez que houve um grande desenvolvimento de tecnologia baseada nestes energéticos, e que continua a se pesquisar melhorias nessa tecnologia com a finalidade de se obter cada vez mais o melhor custo/benefício, otimizando os rendimentos energéticos aliados à minimização de impactos ambientais decorrentes de tais processos.

No Brasil, quando se direciona para a geração de energia elétrica, o que se destaca é a hidráulica, devido ao grande potencial que existe e o custo de exploração ser relativamente barato comparado a outras fontes energéticas, porém com aumento da população e uma economia aquecida há que se pensar em equacionar a utilização de várias fontes de energia disponíveis no Brasil, sendo uma delas o carvão mineral, concentrado na região sul.

\*Rua José Izidoro Biazzetto, 158 - Bloco A - CEP 81200-240 - Curitiba - PR - BRASIL  
Tel.: (041) 331-2985 - Fax: (041) 331-4449 - e-mail: waldir.sampaio@copel.com

As menores reservas de carvão são no Paraná, entretanto tem-se um energético com melhor poder calorífico com a desvantagem de um teor de enxofre elevado.

O objeto deste informe é relatar sobre uma das mais recentes tecnologias para geração de energia elétrica, a partir do carvão paranaense e a utilização de subprodutos gerados da queima.

## 2.0 - O CARVÃO MINERAL

### 2.1 Formação geológica

O carvão mineral é uma rocha sedimentar combustível constituída de restos vegetais, depositados em ambientes subaquáticos impedindo o contato com o ar, criando assim condições que permitiram sua preservação. Esse material protegido da ação do oxigênio do ar sofreu uma decomposição parcial pela ação bacteriana preservando a matéria orgânica, e paralelamente esse material foi submetido à ação de pressões exercida por camadas sobrepostas de outros sedimentos e a um aumento de temperatura devida ao grau geotérmico e proximidade com rochas efusivas.

A combinação do processo de deposição, soterramento e a ação de processos geológicos como subsidência, abalos sísmicos e outros propiciaram a transformação da matéria vegetal passando de:

Restos vegetais para: Turfa – Lignito – Carvão Mineral ou Hulha – Antracito e no prosseguimento passando pelo processo de metamorfose há a formação de grafite (rocha metamórfica).

O processo de transformação da matéria vegetal em carvão denomina-se hulheização ou carbonização, cuja duração é referida em milhões de anos. No decorrer do processo as camadas de matéria vegetal foram sendo contaminadas por outros materiais que aportaram através de arrastes e soluções aquosas e que passaram a fazer parte do carvão, na forma de siltitos, argilas, sulfatos, carbonatos e outros minerais que constituem o material inorgânico representados pela cinza do mesmo.

### 2.2 Caracterização do carvão

A caracterização do carvão é feita através de análises químicas e ensaios físico-químicos padronizados por normas oficiais.

Sendo o carvão uma mistura de material orgânico e inorgânico a determinação de sua composição e propriedades é fundamental para a sua exploração, beneficiamento, comercialização e projetos para seu uso. O processo de caracterização inicia com a amostragem a qual é normatizada com uma metodologia específica para cada caso, seguindo-se a preparação, cominuição, etc. para daí seguir para o laboratório onde serão procedidos ensaios e análises. A primeira bateria de análise é conhecida como análise imediata que consta da determinação dos teores de umidade, cinza, matéria volátil e carbono fixo. Outra seqüência importante de determinações é fornecida pela análise elementar, que é a determinação de carbono, hidrogênio, nitrogênio, oxigênio e enxofre. Outras determinações importantes são: Poder Calorífico, enxofre nas suas várias formas, análise das cinzas, temperatura de fusão das cinzas, moabilidade, e outros ensaios especiais para o atendimento a finalidades específicas. A Figura 1 mostra um processo moderno de mineração, que permite a extração de carvão em camadas não muito altas e sem o uso de explosivos.



FIGURA 1 – Mineração contínua de carvão “Continuous Miner”

## 3.0 - PROCESSO EM LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

### 3.1 Câmara de combustão.

O processo de queima do combustível (carvão mineral) no sistema de Leito Fluidizado Circulante (Circulating Fluidized Bed – CFB) acontece em uma câmara de combustão vertical. Para abatimento do enxofre é adicionado

calcário na forma pulverizada, menor que um milímetro, juntamente com o carvão. O segundo é britado e armazenado em um silo alimentador, com uma granulometria mais ou menos homogênea (0 a 5 mm), e o primeiro também armazenado em silo alimentador. Estes são injetados na câmara de combustão (fornalha) de forma contínua e queimados a uma temperatura relativamente baixa, 850 a 950 °C.

O ar que fluidifica o leito composto por carvão e calcário, entra pré-aquecido através de uma grade de orifícios no fundo da fornalha a uma velocidade de 5 a 6 m/s e é denominado de ar primário. O ar excedente e o gás formado pela combustão do carvão desenvolvem uma velocidade relativamente alta e à medida que sobem para o topo da fornalha, arrastam consigo partículas inertes e de combustível, e conforme ocorre à queima, produz-se grande perda de massa, baixando a relação sólidos/gases, que flui para dentro dos ciclones, os quais retêm as partículas mais pesadas. Estas retornam continuamente à fornalha por caminhos apropriados, deixando passar somente as mais leves, ou seja, a cinza, que já é o combustível totalmente queimado. O grande volume de circulação interna de sólidos e a velocidade relativa dos mesmos que circulam interna e externamente à fornalha caracterizam o leito fluidizado circulante, resultando em temperatura uniforme em todo o sistema de combustão. A temperatura máxima de combustão na câmara é controlada por um sistema de intertravamento que é acionado quando se atinge cerca de 950 °C.

Devido a grande diferença de velocidade entre o gás e os sólidos carregados (slip velocity), há um tempo elevado de permanência das partículas sólidas (ainda contendo substâncias combustíveis) em contato muito próximo, tornando-se a queima praticamente total, o que determina a alta eficiência da combustão. Os efeitos mencionados acima favorecem ainda a calcinação do calcário e a subsequente reação com os gases sulfurosos, promovendo a sua neutralização e a formação de gesso.

### 3.2 Sistema de Ar e Gás

Quarenta por cento do ar de fluidização do processo é insuflado, por ventiladores, no fundo do leito e o restante (60%) chamado ar secundário é insuflado, na câmara através de múltiplos orifícios dispostos em vários níveis das paredes laterais da câmara de combustão. O ar é aquecido através de preaquecedores ar/gás de combustão na saída da caldeira. A combustão ocorre em duas zonas; inicialmente ocorre na zona de contato do ar primário de fluidização com o combustível, completando-se na zona superior onde encontra o ar secundário. A queima do carvão em diferentes níveis assegura a não formação de zonas de elevadas temperaturas reduzindo a formação de NOx.

Os gases resultantes da combustão do carvão sobem e saem na porção superior da parede d'água da fornalha, carregando os particulados que entram nos ciclones de recirculação projetados para remover acima de 99% dos sólidos incombustos em suspensão. Os gases continuam o percurso passando pelos preaquecedores de ar e, em seguida, pelo precipitador eletrostático ou filtro de mangas que retiram, a uma eficiência acima de 98%, os particulados.

Os gases são conduzidos a uma chaminé, praticamente isentos de particulados, NOx e SOx, e que tem a altura determinada em função de estudos de dispersão aérea, a qual atende à legislação de meio ambiente determinada pelo órgão ambiental do estado onde se localiza a termelétrica. A chaminé é dotada de plataforma, acesso e conexão para amostragem de gases, podendo ter dispositivos para o monitoramento contínuo de SOx e NOx.

### 3.3 Sistemas de produção de vapor de superaquecimento e de reaquecimento.

A queima do carvão na câmara de combustão (fornalha), libera energia térmica (calor), o qual é absorvido pela água contida na tubulação que compõe a parede d' água da caldeira. O aquecimento da água no interior da tubulação promove o aumento de volume de água diminuindo a sua densidade, promovendo o seu deslocamento no sentido vertical, sentido da área de vaporização (daí a característica da circulação natural). O vapor assim produzido é enviado ao superaquecedor onde sua temperatura é aumentada até o nível específico (característico de cada caldeira), sendo então conduzido à turbina, caracterizada por setores, que podem ser divididos em três, o primeiro de alta pressão, o segundo de média pressão e o último de baixa pressão. O vapor superaquecido é admitido no estágio de alta pressão, perde parcialmente energia passa para o segundo estágio da turbina (média pressão) onde novamente cede energia para então ser conduzido ao terceiro estágio (baixa pressão) e finalmente para o condensador. Este processo pode ter um melhor rendimento se for adotado uma extração de vapor depois do estágio de alta pressão e conduzido à caldeira para que sofra um incremento de entalpia e reconduzido ao segundo estágio de média pressão. Tal processo é muito próximo do que pode ser utilizado em uma planta para consumo do carvão do Paraná. A Figura 2 mostra esquematicamente o processo em leito fluidizado circulante com caldeira de reaquecimento de vapor.

## 4.0 - CONSIDERAÇÕES SOBRE O LEITO FLUIDIZADO CIRCULANTE

O leito fluidizado circulante se configura como uma tecnologia versátil, tendo como características principais:

- A flexibilidade no uso de diversos combustíveis sólidos e de baixo poder calorífico e alto teor de cinzas,

ou seja, em caldeiras que utilizam a circulação natural, o mesmo, apresenta uma alta taxa de troca térmica, enquanto que em tecnologia convencional a taxa é em torno de  $50 \text{ kcal/m}^2/^{\circ}\text{C}$ , no leito fluidizado é em torno de  $240 \text{ kcal/m}^2/^{\circ}\text{C}$ ;

- ❑ Tem a capacidade de abater gases indesejáveis ao meio ambiente, durante a combustão, captando o enxofre através de adição de calcário na fornalha junto com o combustível, evitando-se o custo de utilização de uma planta adicional de abatimento do SO<sub>x</sub>, como por exemplo um lavador de gases “Scrubber” e em temperatura de queima relativamente baixa (850 °C) e somado o excesso de ar também evita-se a formação do Nox, ambos acima de 98%;
- ❑ Com a baixa temperatura de combustão há uma melhora sensível na operação, pois os problemas com a formação de escória, incrustações e corrosão nos circuitos dos gases, são minimizados;
- ❑ O custo de preparação, no caso do carvão, é menor porque para o leito fluidizado circulante necessita-se uma granulometria de 0 a 5 mm enquanto que em carvão pulverizado é da ordem de 70% abaixo de 70 mesh;
- ❑ Projeto mais compacto, evitando-se o custo com equipamentos acessórios à caldeira e outros mais.

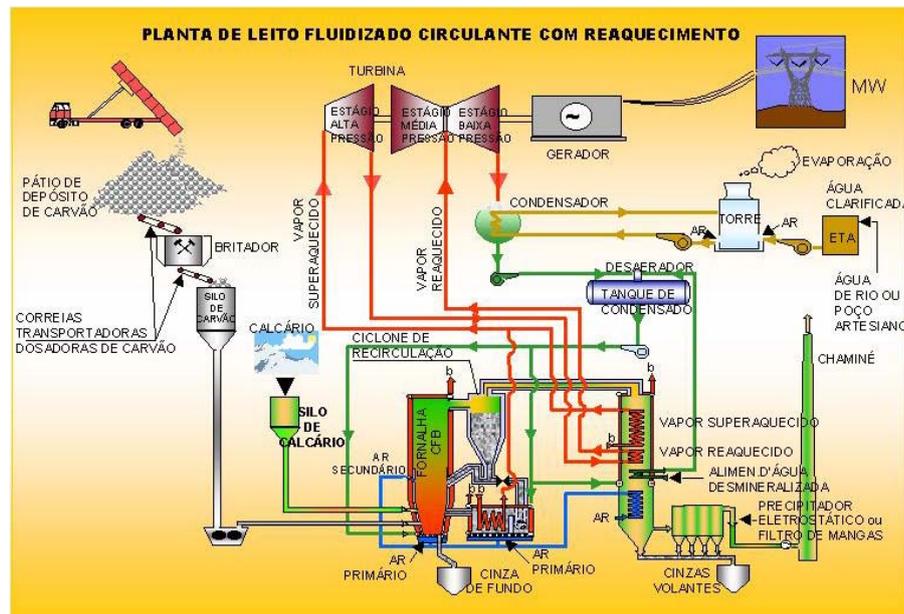


FIGURA 2 – Leito fluidizado circulante com reaquecimento de vapor.

## 5.0 - ABATIMENTO DE EFLUENTES DA QUEIMA DO CARVÃO MINERAL E SUBPRODUTOS GERADOS.

### 5.1 Processos de abatimento de material particulado

O material particulado ou cinzas leves em uma planta de geração termelétrica a carvão deve ser extraído de alguma forma. No mundo, duas formas estão consagradas, que são os precipitadores eletrostáticos e os filtros de mangas.

#### 5.1.1 Precipitadores eletrostáticos.

As partículas do efluente gasoso sofrem uma ação de campos elétricos ocasionando a precipitação eletrostática, quando as mesmas passam entre os eletrodos (região de ionização), são bombardeadas por íons, migrando para uma placa de coleta e adquirindo a polaridade do eletrodo de descarga. Os precipitadores eletrostáticos são equipamentos que tem alta performance de coleta para material particulado, partículas finas inclusive ( $0,01 \mu$ ). As cinzas captadas por este processo são transportadas até os silos para posterior destinação.

### 5.1.2 Filtros de mangas;

No mundo, grande parte das usinas termelétricas está equipada com filtros de mangas, os Estados Unidos são prova disso. Há mais de 100 anos os filtros de mangas têm sido usados na indústria e há mais de 70 anos está instalado em grande parte das plantas de geração de energia termelétrica de grande porte para o controle de emissões de partículas.

O uso de meios filtrantes e a correspondente velocidade dos gases assegura uma grande eficiência a esta tecnologia, fato comprovado, que permite aperfeiçoar o comportamento de partículas provenientes de diferentes tipos de combustíveis, como carvões de variadas qualidades e óleos combustíveis.

Na combustão produz-se a suspensão gás/particulado que é conduzida ao filtro de mangas de tecido apropriado. Um acelerador de alta velocidade fica situado na ponta de cima de cada manga, por onde sai o gás limpo. Este gás é tirado por um ventilador para a chaminé. Os filtros são limpos com ar comprimido, sendo as partículas recolhidas em um silo para posterior destinação.

### 5.2 Processos de dessulfurização do gás resultante.

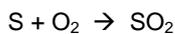
Além dos particulados gerados pela combustão do carvão, há a formação de gases oriundos do enxofre contido no combustível. Caso o enxofre não seja seqüestrado na queima, caso do leito fluidizado circulante, se formará no gás as moléculas do dióxido e trióxido de enxofre, sendo o segundo em pequena escala, e são denominados genericamente de SO<sub>x</sub>.

O dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) que é a maior parte do gás gerado, em condições favoráveis de ambiente, pode reagir como oxidante ou redutor, propiciando a formação de SO<sub>3</sub>, H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, sulfatos e outros.

#### 5.2.1 Abatimento do enxofre no leito fluidizado circulante.

Uma das principais características do leito fluidizado circulante é a remoção do enxofre evitando-se a formação do SO<sub>x</sub> para o meio ambiente, permitindo assim o uso de carvão com alto teor de enxofre. Como já descrito no item 3.1, o processo de dessulfurização se dá na seguinte forma:

- A oxidação do enxofre contido no carvão



A calcinação do calcário, formando o óxido de cálcio



A reação dos óxidos formando o gesso



As condições ideais para uma remoção de enxofre acima de 90%, acontecem com temperatura de queima entre 750 °C e 850 °C, uma relação de Ca/S entre 1,5 e 3 e um adicional de 10% de calcário dolomítico para cada 1% de enxofre.

A desvantagem do gesso formado no leito fluidizado é que o mesmo sai juntamente com outras impurezas. Uma opção é o abatimento do SO<sub>x</sub> em um lavador de gases "FGD( Flue Gás Dessulfurization)" instalado após o sistema de remoção de partículas, sendo que este processo também utiliza calcário (CaCO<sub>3</sub>) ou a cal (CaO) que ao entrarem em contato com o gás isento de particulados, captura o SO<sub>x</sub> produzindo gesso de qualidade para comercialização.

#### 5.2.2 Abatimento de enxofre utilizando amônia

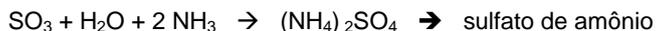
Outra opção mais moderna para a dessulfurização é a utilização de sistema de lavagem de gases utilizando um álcali como, por exemplo, a amônia que seqüestra o SO<sub>x</sub> em torno de 95%, produzindo o sulfato de amônio da ordem de 95% de pureza.

Esta neutralização em lavador de gases que utiliza amônia se dá de duas formas, ou seja:

- O SO<sub>3</sub> pode causar grandes avarias nas partes metálicas por onde passa, mesmo sendo em pequena quantidade, se atingir o ponto de orvalho do ácido sulfúrico na seguinte reação;



a amônia estequiometricamente dosada reage com o SO<sub>3</sub>, como mostra a reação abaixo, formando o sulfato de amônio, sal básico sem problemas para dutos e trocadores de calor, por onde passa;

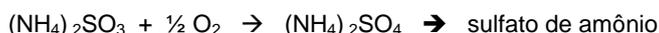


- O SO<sub>2</sub> é o grande percentual do gás formado na combustão do carvão, não reage facilmente com a amônia, necessitando para isso de água em determinada temperatura. A reação com a amônia é imediata e forma um produto intermediário que se oxida facilmente com o oxigênio do excesso de ar de queima como mostra na seqüência da reação:

Formação do sulfito de amônio, produto altamente instável, demonstrado na reação abaixo, que tem grande afinidade por água;



O sulfito na presença de H<sub>2</sub>O reage formando a solução de sulfato de amônio, mostrado a seguir;



## 6.0 - UTILIZAÇÃO E MERCADO DE SUBPRODUTOS.

### 6.1 Gesso

O gesso gerado no processo de leito fluidizado é extraído juntamente com as cinzas, portanto contendo impurezas.

Fora a possível utilização para mistura no cimento ou em elementos de concreto, o gesso não apresenta condições de comercialidade, a não ser que seja obtido da forma citada no item 5.2.1, ou seja, em lavador de gases, onde se tem gesso de qualidade comercial.

O consumo de gesso no Brasil, na forma "dry wall" para construção civil, segundo indicadores da construção civil, ainda é pequeno comparado ao dos Estados Unidos que é de 2,5 bilhões de m<sup>2</sup>/ano, ou seja, 10 m<sup>2</sup> per capta/ano e da Europa e países mais desenvolvidos entre 3 e 5 m<sup>2</sup> per capta/ano. O Brasil fica com um modesto consumo de 0,06 m<sup>2</sup> per capta/ano, sendo que a construção civil brasileira teve certo incremento no consumo de placas de gesso como mostra a Tabela 1.

TABELA 1 – Consumo de gesso "dry wall".

Ano	1999	2000	2001	2003
<b>Consumo</b> (milhões m <sup>2</sup> )	7,5	11,0	11,5	13,0

Testes vêm sendo feito em laboratório oficial e que comprovam a qualidade de tal material, que pode representar em futuro próximo uma excelente alternativa para o setor desta forma aumentando a demanda e talvez viabilizando o aproveitamento de gesso gerado em termelétricas futuras.

### 6.2 Cinzas.

As cinzas produzidas a partir da queima do carvão mineral em usinas termelétricas, constituem-se em impacto econômico/ambiental para as novas e atuais usinas. O problema é mundial, sendo que no Brasil estima-se que 1,7 milhão de toneladas por ano de tais cinzas são geradas e apenas 30% são utilizadas na forma de adição ao cimento, fabricação de artefatos de concreto, revestimentos civis e como material fertilizante.

### 6.3 Sulfato de amônio.

Produto da dessulfurização com o gás amônia, o sulfato de amônio é amplamente utilizado como fertilizante. O Brasil com dados de 1998, consome acima de 1,5 milhões de toneladas deste produto, sendo que em 2004, importou cerca de 85% do consumo anual.

## 7.0 - CONCLUSÃO

Apesar da tecnologia convencional de pulverização do combustível, com queimadores direcionais ser consagrada mundialmente, ela exige um combustível de melhor qualidade para a sua queima adequada, no caso do carvão, se o mesmo tiver alta porcentagem de contaminante como é o caso do enxofre, a planta térmica exigirá equipamentos adicionais que elevarão o custo do empreendimento. Assim sendo o leito fluidizado circulante, como descrito anteriormente é a tecnologia que vêm sendo testada e reconhecida como uma solução viável, com melhor rendimento térmico e ambientalmente correta para o uso racional de vários combustíveis como a biomassa, lixo e principalmente do carvão brasileiro, e especificamente o do Paraná, face as suas características. A exploração do carvão brasileiro se justifica por ser uma riqueza disponível em nosso subsolo, sendo que o mesmo não depende de importação e pode gerar, além da energia, insumo vital para a economia, empregos e divisas para o país.

Com a tecnologia de dessulfurização com amônia, tem-se a vantagem no que diz respeito ao abatimento do enxofre, porque ela gera um produto de alto valor agregado e com cem por cento de utilização, porém pesa sobre ela o fato de ser uma tecnologia nova no Brasil e que pode aumentar em muito o custo do investimento da planta de geração e sua operação, mas que se apresenta como uma solução cabível de análise para implantação, principalmente em situação experimental em usina que não possua sistema de abatimento de gases, desta forma servindo de parâmetro para novos projetos.

Para o futuro, pesquisas mais intensiva deveriam ser feitas sobre os subprodutos gerados em termelétricas, pois assim como o mundo se preocupa com cinzas oriundas da queima do carvão, teremos outras formas de geração de energia com biomassa e a termodestruição de lixos, por exemplo, que produzirão resíduos sólidos também.

## 8.0 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) UFSC – RWTH / Seminário Sobre Tecnologia do Carvão – Florianópolis/dezembro 1981.
- (2) CIENTEC – Identificação dos Usos Possíveis (Estado da Arte) Para as Cinzas Carboníferas de Termelétricas Brasileiras – setembro/1996.
- (3) ELETROSUL, 1990 – Anais do I e II Seminário de Estudos da Aplicação dos Resíduos da Combustão do Carvão Mineral – Florianópolis.
- (4) RADOVANOVIC, M (1986) Fluidized Bed Combustion - Hemisphere Publishing Corp., Washington DC.
- (5) Catálogos de fabricantes internacionais de caldeiras para usinas termelétricas.
- (6) Revista de agronegócios da FGV – setembro de 2004.
- (7) ANBA – Notícia de 10/10/2003 – Fertilizantes.
- (8) Notícias do setor de construção civil – dezembro/2004.