

ABSORÇÃO QUÍMICA DE DIÓXIDO DE NITROGÊNIO (NO₂)**CHEMICAL ABSORPTION OF NITROGEN DIOXIDE (NO₂)***ANDRÉ BÚRIGO LEITE*

Engenheiro Químico pela Universidade Regional de Blumenau (FURB). Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Regional de Blumenau (FURB). Professor e Coordenador do curso de Engenharia Ambiental na Universidade do Contestado (UnC)-Concórdia

SÁVIO LEANDRO BERTOLI

Engenheiro Químico pela Universidade Federal de Santa (UFSC). Mestre em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa (UFSC). Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Santa (UFSC), Professor e Pesquisador do Departamento de Engenharia Química da Universidade Regional de Blumenau (FURB)

ANTÓNIO ANDRÉ CHIVANGA BARROS

Químico Industrial pela Universidade Federal da Paraíba (UFP). Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal da Paraíba (UFP). Doutor em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Professor e Pesquisador do Departamento de Engenharia Química da Universidade Regional de Blumenau (FURB)

Recebido: 10/05/04 Aceito: 26/01/05

RESUMO

A absorção gasosa é comumente utilizada, nas indústrias de processos, para recuperar/obter compostos com alto valor agregado, bem como para a minimização de poluentes em ambientes aéreos contaminados. Neste trabalho, avaliou-se a influência dos parâmetros de processo para recuperação do NO₂, utilizando-se o simulador comercial Process Provision (PRO II[®]). Com os resultados obtidos observou-se que a fração molar de NO₂ no topo da coluna de absorção é praticamente nula. Fato, que levou a estabelecer uma relação entre as taxas de absorção, com reação química, e a capacidade de transferência de massa ao longo da coluna de absorção com pratos. O HNO₃ formado pode ser recuperado, podendo vir a ser matéria-prima na fabricação de fertilizantes inorgânicos.

PALAVRAS-CHAVE: Absorção gasosa, transferência de massa, NO₂.

ABSTRACT

The gaseous absorption is commonly used in the industry of processes for the recovery/obtain compounds with a high aggregated value, as well as for the minimization of pollutants in aerial contaminated environments. In this work, the influence of the parameters of the processes was evaluated for recovery of the NO₂ using the commercial simulator Process Provision (PRO II[®]). With the results obtained, a relation between the absorption rates, with chemical reaction, and the capacity of mass transference along the absorption column with plates, was established. The HNO₃ can be recouped, being able to come to be substance manufacture.

KEYWORDS: Gaseous absorption, mass transference, NO₂.

INTRODUÇÃO

A absorção de gases é um processo muito utilizado em plantas industriais, principalmente nos processos químicos, seja na preparação da matéria-prima para a transformação de insumos em produtos finais bem como na purificação dos produtos obtidos de tais processos, que consistem na transferência de um componente de uma mistura gasosa para um líquido absorvente devido à solubilidade e à diferença de concentração entre as fases. Além disso, a transferência de massa bem como as reações químicas envolvi-

das em todas as fases acontecem simultaneamente e são extremamente importantes para a prática dos processos industriais.

O conhecimento dos fenômenos de transferência de massa envolvidos, neste processo, é essencial para a avaliação da capacidade de separação e o cálculo da eficiência de transferência de massa, condições operacionais primordiais para o dimensionamento de equipamentos utilizados neste tipo de operação unitária. Estes equipamentos, definidos como colunas de absorção, incorporam em seu interior dispositivos que visam o aumento da área efetiva de transferência de mas-

sa e são descritos na literatura como dispositivos auxiliares de contato líquido-gás. Tais dispositivos, denominados pratos, dependendo da sua característica física e mecânica podem ser perfurados, valvulados ou de campânulas, e apresentam diferentes características operacionais principalmente no que se refere aos fenômenos de transferência e de borbulhamento entre as fases na sua superfície.

A caracterização deste tipo de processo, e a sua grande relevância fenomenológica, leva a sua aplicação ao tratamento de gases presentes em ambientes aéreos que estão sujeitos, face à natureza de

atividades de transformação, à presença de fontes geradoras de gases orgânicos e inorgânicos. Estes contaminantes distribuem-se pelo ambiente aéreo, principalmente, pelos mecanismos convectivos e difusivos de transferência de massa associados a quantidade de movimento.

A absorção pode ser um processo puramente físico ou seguido por reações químicas, dependendo do grau de solubilidade do soluto no solvente. A absorção com reação química, foco deste trabalho, tem vasta aplicação industrial, principalmente para a remoção de gases ácidos, misturas inertes e hidrocarbonetos em correntes de ar. Quando utilizada, a reação química aumenta a taxa de absorção e a eficiência de transferência de massa, devido ao incremento da solubilidade decorrente da presença dos reagentes. Além disso, a manipulação dos parâmetros de processo (temperatura, pressão, vazões de alimentação, entre outros) influencia diretamente nas taxas de reação.

As operações de absorção são de emprego generalizado nas indústrias químicas, petroquímicas e de alimentos bem como nos equipamentos do controle de poluição. Na indústria química, a produção de ácidos clorídrico e sulfúrico envolve a absorção de gases em sua fase final e muitos outros processos incluem a absorção em etapas intermediárias. A absorção é utilizada também, para a recuperação dos produtos gasosos de misturas diluídas, como é o caso da lavagem do gás de coque para absorção de amônia (NH_3), nele contida, e o de absorção de dióxido de enxofre (SO_2) em solventes como mono e dietanolamina. Na indústria de petróleo a absorção de componentes mais pesados, do que o metano, é feita em óleos leves na produção do gás natural. (Gomide, 1988).

Os processos de absorção de NO_x são relevantes para a produção de HNO_3 utilizado na fabricação de fertilizantes inorgânicos, como o nitrato de amônia. Andrew e Hanson (1961) desenvolveram estudos de processos de absorção de gases nitrosos em água, em colunas com pratos perfurados, e avaliaram a influência da vazão do gás na taxa de transferência de massa. Similarmente, Dekker et al. (1959) observaram que a fase gasosa proporciona maior resistência à transferência de massa, controlando, desta forma, o processo de absorção.

Suchar e Josi (1994), consideram que os processos de absorção de NO_x são complexos por envolverem reações químicas que demandam mecanismos complexos no modelo matemático e envolver

estequiometria que contempla as diversas formas de NO_x (NO , NO_2 , N_2O_3 , N_2O_4) além da reversibilidade e irreversibilidade das reações químicas, dificultando ainda mais o processo.

Kelly *et al* (1984) utilizaram o processo de absorção para a remoção de gases ácidos tendo metanol como o solvente. Para os autores, outros solventes podem ser utilizados, tais como metanolamina e o dietanolamina, mas as limitações com relação ao uso destes, são devido ao grande número de compostos sulfurosos formados, presença de hidrocarbonetos e dióxido de carbono (CO_2) que devem ser constantemente removidos durante a operação de absorção.

Para Azevedo e Cruz (1994), quando se deseja que o gás ácido seja removido até teores menores, utiliza-se o processo de absorção com um agente líquido como solvente. Entre diversos solventes físicos e químicos utilizados para a remoção de gases ácidos, os mais utilizados comercialmente são as alcanolaminas aquosas (aminoálcoois) e carbonato de potássio aquecido. Estas aminas apresentam vantagens sobre outras, tais como baixa volatilidade, alta solubilidade em água e também custos razoavelmente moderados. Além da escolha adequada do solvente, é necessário dimensionar e avaliar o sistema de tratamento da corrente gasosa, em particular a coluna de absorção.

Existem diversas publicações que tratam de projetos de colunas de absorção. Quando a absorção é puramente física, o projeto é relativamente simples, desde que os dados necessários estejam disponíveis. Entretanto, quando há presença de reação química, informações adicionais são necessárias e, geralmente, o projeto torna-se mais dispendioso. Assim, no caso de absorção com reação química, apesar de serem descritos na literatura vários métodos de projeto, há uma carência de uma metodologia mais didática para o desenvolvimento do mesmo. Além disso, há dificuldade na obtenção dos dados necessários, quer experimentais, quer de estimativas.

De Leye e Froment (1986a e 1986b) descreveram um algoritmo para o projeto de uma coluna de absorção com reação química e alguns exemplos de aplicação sem, entretanto, apresentar o programa computacional. Em 1994 Azevedo e Cruz, desenvolveram um programa em linguagem PASCAL, mostrando detalhes do modelo matemático, onde avaliaram o número de estágios reais numa coluna de absorção com reação química para o sistema dióxido de carbo-

no/monoetanolamina e avaliaram alguns parâmetros de projeto sobre a capacidade da recuperação do dióxido de carbono.

Modelagem de estágios de equilíbrio

A modelagem de estágios de equilíbrio tem sido muito explorada, na literatura, por diversos autores, destacando-se Higler *et al* (1998) que desenvolveram o modelo para determinar o número de pratos reais, baseado na definição de Lewis (1922) e Powerst *et al* (1988) que avaliaram o grau de separação mediante a implementação das taxas de transferência de massa e de energia na interface líquido-gás, numa seção de uma coluna de recheios. No trabalho desenvolvido pelos autores o equilíbrio termodinâmico foi considerado, condição que permitiu introduzir a eficiência de transferência de massa para corrigir as distorções oriundas das suposições de equilíbrio entre as correntes que abandonam um dado estágio.

Para a descrição do modelo matemático a Figura 1 é utilizada, na qual se observa que um gás que contém um soluto é alimentado no fundo da coluna e um líquido puro (solvente) é alimentado no topo deste equipamento e ambas as correntes escoam em contracorrente permitindo uma forte interação entre as fases nos diversos dispositivos internos de contato. Neste processo o soluto é transferido da fase gasosa para a fase líquida, permitindo que a corrente gasosa, que abandona a coluna, tenha uma redução no poluente, cujo grau de recuperação depende da eficiência de transferência de massa neste processo. O poluente absorvido pela fase líquida poderá, numa segunda etapa, ser recuperado utilizando outros processos de separação tais como a destilação, adsorção líquida, entre outros.

No estágio ideal ou de equilíbrio, Figura 2, a mistura entre as fases é hipoteticamente perfeita, de modo que as correntes que deixam o estágio estejam em equilíbrio entre si e a intensidade de mistura caracteriza a ausência do gradiente de concentração ao longo do prato.

Balanco de massa por componente no prato N

O balanço de massa por componente, que descreve o modelo matemático do processo de absorção e que inclui as correntes de alimentação e as saídas laterais do gás e do líquido, é apresentado na Equação 1.

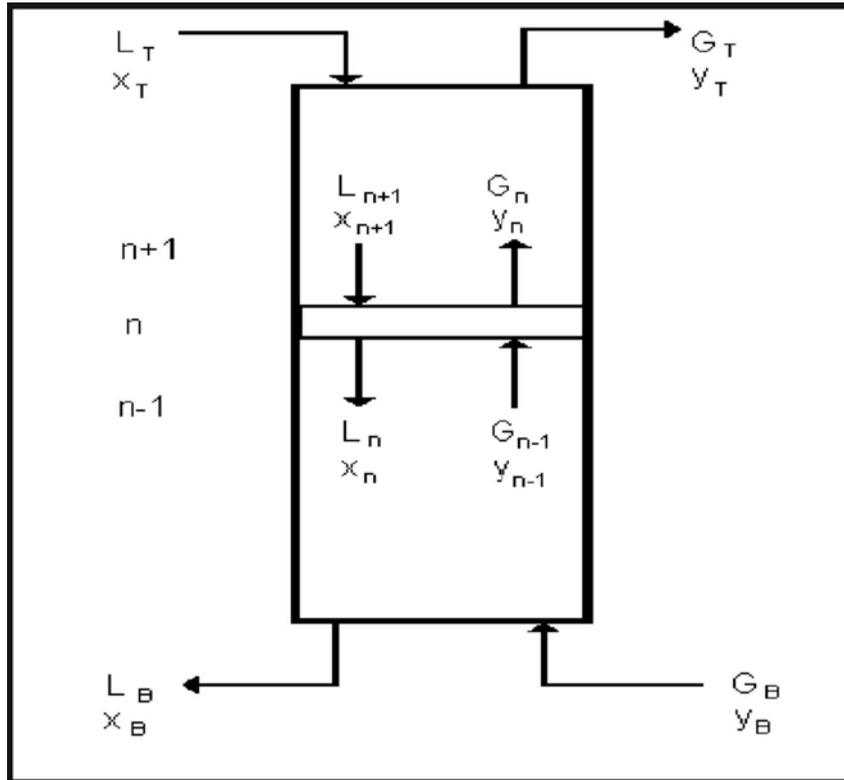


Figura 1 - Coluna de absorção caracterizando modelo de equilíbrio

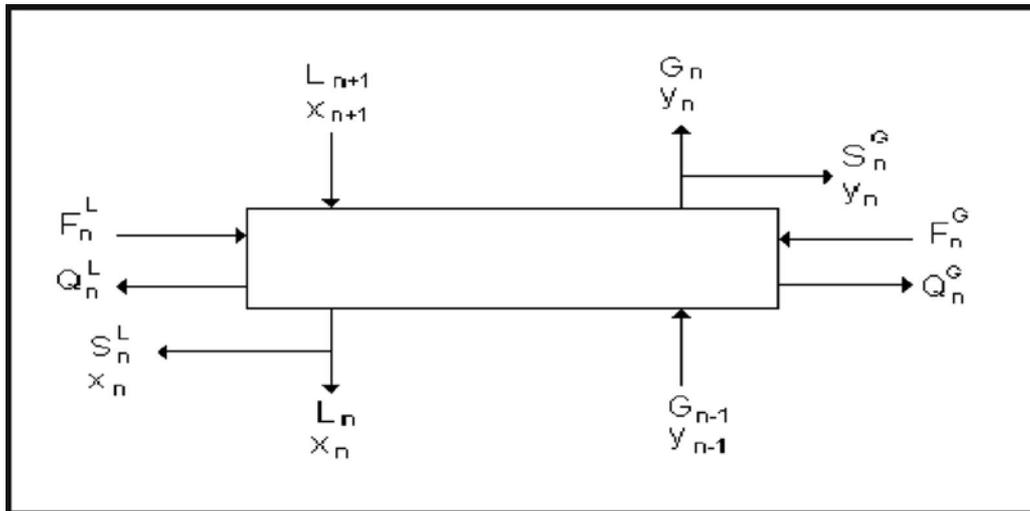


Figura 2 - Caracterização das correntes no estágio de uma coluna de absorção

$$BM_{n,j} = \left(1 + \frac{S_n^G}{F_n^G}\right) \cdot fgg_{n,j} - fgg_{n-1,j} + \left(1 + \frac{S_n^L}{F_n^L}\right) \cdot fl_{n,j} - fl_{n+1,j} = 0 \quad (1)$$

Em que S^G e S^L são os fluxos de gás e líquido na corrente lateral (mol/s), F é o fluxo do componente na alimentação (mol/h) e fgg e fl são os fluxos do componente na fase gasosa e na fase líquida

(mol/s), respectivamente. Nesta avaliação não estão envolvidos os balanços de energia pois o processo é isotérmico e, genericamente, as temperaturas das correntes de alimentação são iguais.

Modelagem de estágios de equilíbrio com reação química

Muitos processos de absorção industrial ocorrem com reações químicas, principalmente na fase líquida entre o

solvente e o soluto, cujos produtos da reação são solúveis no líquido. A reação de um soluto absorvido com um reagente na fase líquida, segundo Treybal (1980) tem como principais consequências:

- a formação de um novo composto que reduz a pressão parcial do soluto, tendo como consequência o aumento da força motriz entre as fases e o aumento da taxa de absorção;
- aumento dos coeficientes de transferência de massa da fase líquida que contribui para o aumento das taxas de absorção.

Segundo Perry e Chilton (1986) a maioria dos processos de absorção usados nas indústrias envolve reações químicas na fase líquida, reações estas que elevam a taxa de absorção e aumentam a solubilidade do soluto no solvente, quando comparado com absorção física. Porém, faz-se necessário o conhecimento dos princípios da absorção física, para o entendimento da absorção química. Esta recomendação se faz necessária, uma vez que, métodos clássicos de projetos aplicados em equipamentos de absorção física, que admitem processo isotérmico ou adiabático, têm sido aplicados em projetos de equipamentos que envolvem absorção química. Porém, para os autores, o projeto dos processos de absorção, envolve procedimentos rigorosos baseados em simplificações, válidas para várias condições de operação.

Nestes procedimentos a temperatura da fase líquida é assumida constante ao longo do equipamento e igual a sua temperatura de alimentação. Esta aproximação ignora todos os efeitos térmicos do processo e é somente válida quando o gás de alimentação é suficientemente diluído. Como observou Perry *et al* (1984), o problema que surge ao se considerar válida esta aproximação é definir, para cada sistema, os parâmetros relacionados à diluição.

Um outro método clássico, de projeto, admite o comportamento adiabático para a coluna de absorção, assumindo, dessa forma, que o calor de solução serve somente para aquecer o líquido. Por esta razão, torna-se possível relacionar o aumento da temperatura da fase líquida com a concentração de soluto por um balanço de entalpia. Com relação à validade deste método, comparações feitas por Stockar *et al* (1974) com métodos mais rigorosos e clássicos de projeto admitindo a hipótese do comportamento adiabático para coluna de recheio, permitiram o uso de fatores de correção (1,25 a 1,5) para a determinação da altura real do recheio.

Uma das considerações importantes envolvidas no projeto e operação de colunas de absorção, com reação, é a determinação do perfil de temperatura ao longo da coluna e a análise dinâmica do processo, para processos não permanentes, de forma a se avaliar estratégias de controle e modificações das condições operacionais do equipamento uma vez que, a solubilidade do gás depende fortemente da temperatura.

Segundo Perry e Chilton (1986), quando os efeitos térmicos não podem ser desprezíveis, como nas aproximações

isotérmica e adiabática, o dimensionamento das colunas de pratos ou recheio é mais complexo.

Pode-se estender esta observação ao estudo de estratégias de controle para colunas de absorção com reação química, uma vez que, com as simplificações que envolvem os efeitos térmicos, a modelagem e simulação do processo tornam-se mais simples, em termos de variáveis controladas e manipuladas. Desta forma, deve-se verificar as condições de operação mais adequadas para a representação do comportamento real e utilizá-la no estudo de estratégias de controle.

Segundo Froment e Bischoff (1990), até recentemente, o projeto e simulação de colunas de absorção, com reação química, tem sido baseado em simplificações como as citadas. Sendo assim, os autores desenvolveram modelos rigorosos, no estado estacionário, para colunas de pratos, admitindo condições de operação não isotérmicas e não adiabáticas. Os autores observaram os detalhes técnicos e características operacionais de vários tipos de colunas de pratos discutidas na literatura, baseado em correlações obtidas através de aproximações teóricas. Estas aproximações, segundo os autores, estão sendo substituídas por modelos reais obtidos com o envolvimento das taxas de transferência de massa, explicitamente, no modelo matemático. Justificam os autores que esta aproximação, por considerar os fluxos de transferência de massa explicitamente, pode descrever o processo de absorção com reação química de uma forma mais realística.

Stockar *et al* (1974), avaliaram os efeitos térmicos no processo de absorção em colunas de pratos e concluíram que os mesmos são responsáveis pelo aumento da temperatura, ao longo da coluna, baseado nos seguintes fatores:

- calor de solução do soluto (incluindo o calor de condensação, calor de mistura e calor de reação);
- calor de vaporização e condensação do solvente;
- troca de calor sensível entre a fase líquida e a fase gasosa;
- perda de calor sensível para as serpentinas de resfriamento ou para a atmosfera através das paredes da coluna.

Segundo os autores, nas situações reais, a forte interação entre os parâmetros descritos impede aproximações por simplificação. Neste caso, é recomendado o desenvolvimento de um modelo que envolva os efeitos térmicos para a avaliação dos processos de absorção gasosa que au-

mentam significativamente a complexidade do modelo.

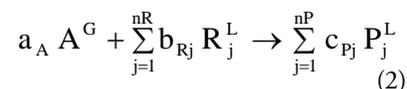
Grande parte dos modelos de colunas de pratos foi desenvolvida baseado no conceito de estágios teóricos, caracterizados pelo equilíbrio entre as correntes de gás e de líquido que deixam o estágio. Esta aproximação vem sendo progressivamente substituída por modelos mais realísticos (modelo de estágios de não equilíbrio Barros *et al* (1997, 1997a, b, 1998, 2001), Khrisnamurthy and Taylor (1995)) tanto para os processos de absorção física como os de absorção química.

Colunas de pratos

As colunas de pratos são usadas em processos que envolvem maior tempo de contato entre as fases líquida e gás. Segundo Froment e Bischoff (1990), as colunas com pratos são as mais preferidas, nos processos de absorção química, quando comparadas com colunas de recheio pois envolvem grandes cargas de alimentação, elevado tempo de contato interfacial e grandes coeficientes de transferência de massa, apropriados para este tipo de processos.

A abordagem da modelagem de colunas de pratos apresentada a seguir foi desenvolvida por Froment e Bischoff (1990) e Deleye e Froment (1986a, b), na qual o escoamento do gás ocorre em fluxo pistonado e o líquido no prato é completamente misturado.

Considerando-se, novamente, a Figura 2 que envolve todas as correntes num único prato de absorção e admitindo-se a possibilidade de existência de correntes laterais, correntes de alimentação, além das correntes internas de líquido e gás, pode-se efetuar os balanços macroscópicos de massa global e por componente, conforme a Equação (2) para reação química simples (reação de primeira ordem).



Em que A^G é o componente absorvido, R^L é o reagente na fase líquida e P^L é o produto da reação.

Como as reações podem apresentar diferentes taxas de reação, a composição do soluto na fase líquida, em cada prato, depende do número de Hatta que, para absorção com reações moderadamente rápidas este parâmetro situar-se-á entre 0,3 e 3 e para reações muito rápidas o número de Hatta deverá ser superior a 3.

Para reações moderadamente rápidas o balanço de massa para o componente j é descrito conforme a Equação (3).

$$BM_{n,j} = \left(1 + \frac{S_n^G}{F_n^G}\right) \cdot fgg_{n,j} - fgg_{n-1,j} \left(1 + \frac{S_n^L}{F_n^L}\right) \cdot fl_{n,j} - fl_{n+1,j} + N_j \Big|_{y=0} A'_G \Omega h_F - a_{j,j} r_j (1 - A_G \delta_L) \Omega h_F \varepsilon_L = 0 \quad (3)$$

Em que A' é área interfacial por m³ de espuma sobre o prato (m²/m³), Ω é a seção transversal da coluna (m²), h_F é a altura da espuma, causada pela velocidade de contato entre o vapor e a água, sobre o prato (m), a é o coeficiente estequiométrico, r é a taxa de reação (mol/m³s), A_G é a área interfacial por unidade de volume do líquido (m²/m³), δ é a espessura do filme (m) e ε_L é a fração do líquido na espuma.

Para reações muito lentas (número de Hatta menor que 0,3) o balanço de massa para o componente j é descrito de acordo com a Equação (4).

$$BM_{n,j} = \left(1 + \frac{S_n^G}{F_n^G}\right) \cdot fgg_{n,j} - fgg_{n-1,j} + \left(1 + \frac{S_n^L}{F_n^L}\right) \cdot fl_{n,j} - fl_{n+1,j} - a_{j,j} r_j (1 - A_G \delta_L) \Omega h_F \varepsilon_L = 0 \quad (4)$$

Relevância ambiental do processo de absorção

Na medida em que o tempo passa, as preocupações com o meio ambiente impõem novas estratégias de vida que se defrontam com toda uma série de problemas globais, como a contaminação e degradação do meio ambiente, a crise de recursos naturais, de recursos energéticos e de alimentos.

Com a identificação dos problemas que abalam a humanidade percebe-se que estes não podem ser entendidos isoladamente, pois estão todos interligados e são interdependentes. Tais problemas resultam da alta taxa de crescimento populacional que aumenta a utilização excessiva e desordenada dos recursos do planeta. De todo modo, o consumo exacerbado dos recursos oriundos das reservas naturais proporcionam a degradação progressiva dos solos, poluindo o ar atmosférico e afetando as condições de regeneração dos ecossistemas.

Os processos de absorção podem ser utilizados como "ferramenta" ambiental, pois permitem minimizar os poluentes atmosféricos oriundos dos processos industriais, como o dióxido de nitrogênio avaliado neste trabalho, devido à alta capaci-

dade de recuperação, nas condições de operação avaliadas que proporcionaram a redução significativa deste poluente na corrente gasosa.

Assim, acredita-se que o estabelecimento de novas concepções tecnológicas é uma busca constante de estratégias para o desenvolvimento de tecnologias ambientais capazes de minimizar a emissão de gases tóxicos para atmosfera ou recuperar os gases, condições que favorecem a solução de problemas ambientais.

Encontrando respostas para tais dúvidas, certamente a sociedade tende a encontrar um caminho com o desenvolvimento, porém, garantindo a sustentabilidade do meio ambiente para as gerações futuras.

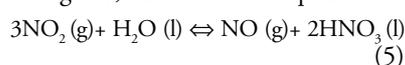
METODOLOGIA

Neste trabalho avaliou-se a absorção de dióxido de nitrogênio (NO₂), em água (H₂O), tendo como produtos de reação o óxido nítrico (NO) e o ácido nítrico (HNO₃), sendo este último importante intermediário na produção de fertilizantes utilizados na agricultura.

O NO₂ é um gás de coloração castanha que pode ser oriundo de diversas fontes antrópicas como motores de combustão interna, fornos industriais, incineradores, indústria de cal, de fertilizante, bem como de fontes naturais como processos biológicos. É um gás que se exposto a ambientes de trânsito humano, pode ser prejudicial à saúde causando desde inflamação no tecido pulmonar, bronquite, e até mesmo a morte.

Para esta simulação, valores das constantes de solubilidade em água e de Henry para os componentes nas diversas temperaturas de simulação, foram fornecidas pelo próprio banco de dados do programa *Process*.

Para avaliar a absorção de dióxido de nitrogênio com reação química, em colunas de absorção, Wiegand et al. (1990) desenvolveram o modelo de equações das taxas de reação e observaram que a reação global (5) pode descrever o fenômeno de transferência de massa com reação química, no processo de absorção. A reação avaliada pelos autores é de 3ª ordem, em relação ao reagente, dióxido de nitrogênio, e ocorre na fase líquida.



Para o desenvolvimento deste trabalho, foi utilizado o simulador comercial *Process Provision PROII* e avaliada a absorção do dióxido de nitrogênio em água, utilizando-se a reação química descrita na Equação 5.

O simulador *Process Provision PROII* foi desenvolvido pela Simsci e vem sendo largamente utilizado na simulação de equipamentos e operações unitárias. Possui um vasto banco de dados no que diz respeito a componentes e processos operacionais. É possível definir diversos parâmetros de operação como unidades de medidas, especificar padrões como pressão, volume, temperatura, permitindo também, que se escolha o modelo termodinâmico.

Trabalhou-se com projeto de colunas com 14 estágios (pratos), cujas temperaturas de alimentação, da fase gasosa e da fase líquida (solvente), foram mantidas constante (30 °C) e avaliou-se a influência dos parâmetros de processo e de projeto sobre a performance da coluna e as taxas de absorção neste processo. Os dados obtidos foram avaliados e estão presentes nos itens subsequentes deste trabalho.

Para se avaliar a influência da vazão das correntes de alimentação sobre o comportamento da coluna de absorção, fixou-se, numa primeira etapa, as vazões de alimentação do gás (100 kgmol/h) e modificou-se as vazões de alimentação do solvente (de 300 à 1000 kgmol/h) e, na segunda etapa do processo, fixou-se a vazão de alimentação do solvente (100 kgmol/h) e modificou-se a vazão de alimentação do gás (de 300 à 1000 kgmol/h), condições que permitiram estabelecer a relação S/F ótima.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 3, observa-se o consumo do solvente (água) e a produção de ácido nítrico.

Os resultados destas avaliações (Figura 4), tanto para os produtos de reação como para o consumo dos reagentes, a melhor performance é alcançada para vazões de gás maiores que a vazão de líquido (relação S/F menor que 1). Este efeito, segundo Counce e Perona (1979), é causado pelo aumento da intensidade de borbulhamento do líquido sobre o prato.

Nas Figuras 4 (e, f) observa-se que o consumo de NO₂(g) aumenta com o aumento da relação entre a vazão de alimentação do solvente (S) e a vazão de alimentação da mistura gasosa (F) (relação S/F) pois, nestas condições de operação, o tempo de contato líquido-gás aumenta em função do aumento da crista (Figura 4) e do aumento da intensidade de borbulhamento (Figura 4 f)), condições que favorecem o aumento dos coeficientes de transferência de massa nos processos de absorção.

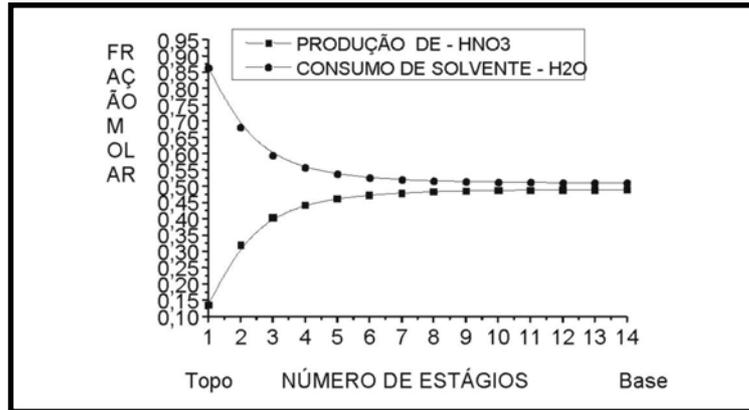


Figura 3 - Característica do processo de absorção reativa: consumo do solvente (água) e produção de ácido nítrico

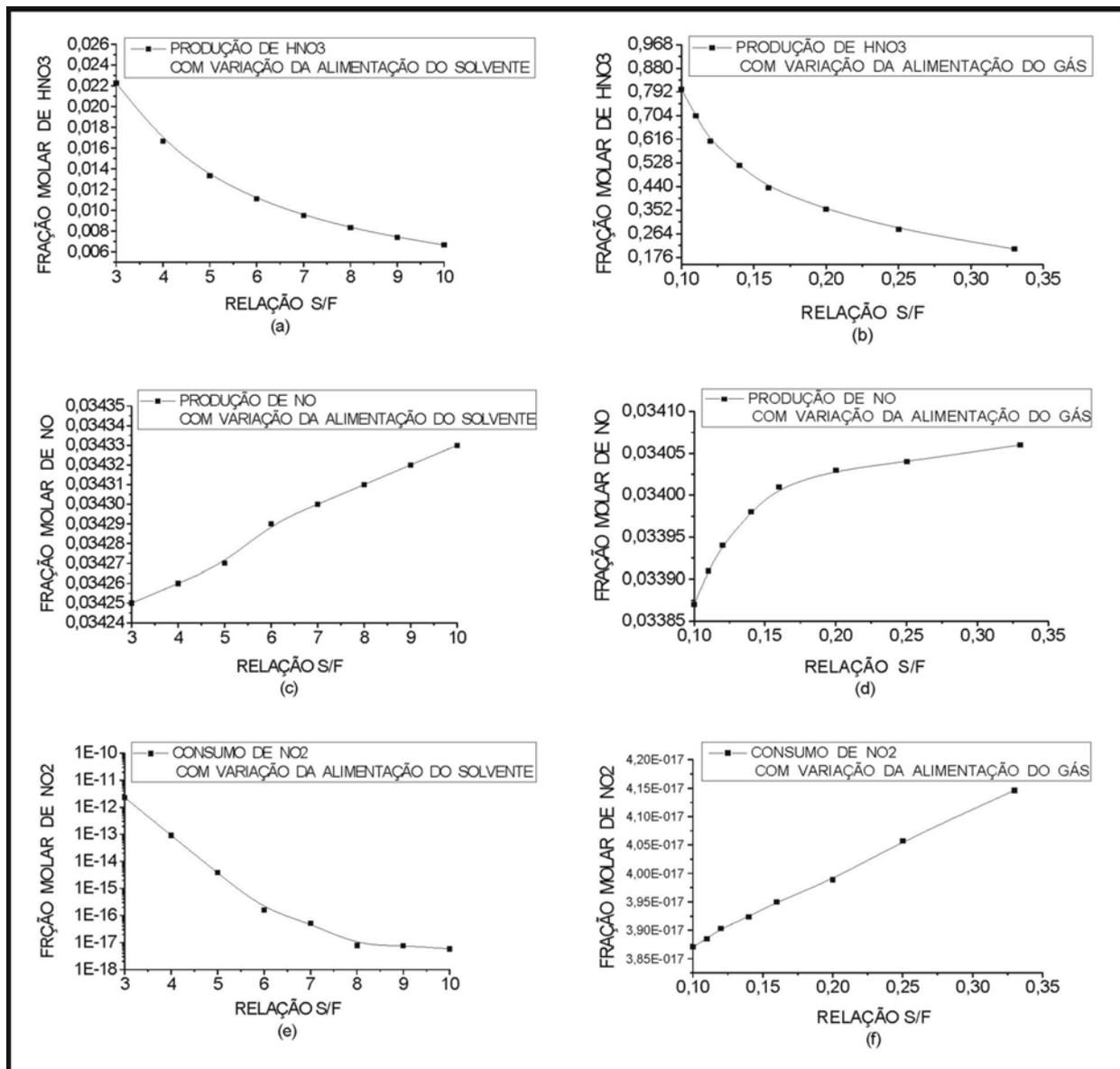


Figura 4 - Relação entre S/F e as frações molares de HNO₃, NO₂ e NO

O comportamento descrito na Figura 4 (e, f) é similar ao comportamento da Figura 4 (a, b) sendo que, desta vez, com o aumento da relação S/F, diminui a fração molar de ácido nítrico na corrente dos produtos da base da coluna.

Para o NO, as frações molares deste componente no topo da coluna de absorção aumentam com o aumento da relação entre as vazões de alimentação. A modificação das vazões ou da reação S/F modifica, acentuadamente, as frações molares dos componentes.

Com base nas avaliações anteriores, obteve-se as condições ideais de operação que permitiram o uso da relação S/F de 0,25 (100/400) como aquela considerada ótima e que atende às especificações da literatura.

Para melhor entender o comportamento descrito na Figura 4 pode-se visualizar os resultados numéricos nas Tabelas 1 e 2, para diversas relações S/F, os quais mostram a influência das vazões de alimentação nos processos de absorção com reação química.

Observa-se nas Tabelas 1 e 2 a quase constância das frações molares do NO. Este fato é devido, a reação do processo (5) favorecer a formação de HNO₃ e não a formação do NO.

As influências das temperaturas de alimentação do gás e do líquido, foram também avaliadas e, similarmente as observações de Holma e Sohlo (1979), o aumento da temperatura da fase gasosa, diminui a formação dos produtos de reação, no processo de absorção de gases que contêm o NO₂ como soluto. Segundo a Wiegand et al (1990), à medida que aumenta a temperatura de alimentação da corrente gasosa, diminui a concentração de HNO₃ na corrente dos produtos do fundo da coluna, como se observa na Figura 5.

A influência da temperatura de alimentação do solvente (Figura 6), foi avaliada tendo-se observado que a temperatura desta corrente não exerce grande influência sobre o comportamento do processo. Neste processo, de uma forma genérica, com o aumento da temperatura do solvente aumenta a formação de HNO₃ e as taxas de absorção de NO₂. Pode-se afirmar que o aumento da temperatura da fase líquida não interfere no processo uma vez que é a fase gasosa que controla o processo de transferência de massa.

CONCLUSÕES

Com os resultados obtidos pôde-se observar que existem parâmetros de gran-

Tabela 1 - Comparação entre as frações molares de HNO₃, NO₂ e NO e a relação S/F

Relação S/F	X (HNO ₃)	Y (NO ₂)	Y (NO)
3	0,02226	2,3006.10 ⁻¹²	0,03425
4	0,01669	9,1391.10 ⁻¹⁴	0,03426
5	0,01335	3,7851.10 ⁻¹⁵	0,03427
6	0,01112	1,6132.10 ⁻¹⁶	0,03429
7	0,00953	5,1610.10 ⁻¹⁷	0,03430
8	0,00834	7,7945.10 ⁻¹⁸	0,03431
9	0,00741	7,7502.10 ⁻¹⁸	0,03432
10	0,00667	5,8026.10 ⁻¹⁸	0,03433

Tabela 2 - Comparação entre as frações molares de HNO₃, NO₂ e NO com a relação S/F

Relação S/F	X (HNO ₃)	Y (NO ₂)	Y (NO)
0,33	0,20748	4,1464.10 ⁻¹⁷	0,03406
0,25	0,28023	4,0574.10 ⁻¹⁷	0,03403
0,20	0,35555	3,9893.10 ⁻¹⁷	0,03404
0,16	0,43467	3,9509.10 ⁻¹⁷	0,03401
0,14	0,51879	3,9243.10 ⁻¹⁷	0,03398
0,12	0,60839	3,9037.10 ⁻¹⁷	0,03394
0,11	0,70296	3,8858.10 ⁻¹⁷	0,03391
0,10	0,80175	3,8719.10 ⁻¹⁷	0,03387

de relevância no processo de absorção de gases com reação química, principalmente na absorção de dióxido de nitrogênio.

A melhor capacidade de operação da coluna de absorção é obtida para vazões de gás maiores que as de líquido, justificado pelo aumento da intensidade de borbulhamento entre as fases sobre o prato e do aumento do tempo de contato líquido-gás.

O aumento da temperatura de alimentação do gás proporciona a diminuição do consumo do soluto bem como a diminuição da formação dos produtos da reação, ocasionados pelos fenômenos de vaporização no processo de absorção, decorrente da baixa temperatura de ebulição dos seus componentes.

LISTA DE NOMENCLATURA

a, b, c, d: Coeficientes estequiométricos
A: Componente
A_G: Área interfacial gás-líquido por unidade de volume do líquido (m²/m³)

A_G: Área interfacial gás-líquido por m³ de espuma sobre o prato (m²/m³)
BM: Balanço de massa
F: Fluxo (vazão mássica) do componente na alimentação (mol/h)
fll: Fluxo do componente na fase líquida (mol/s)
fgg: Fluxo do componente na fase gás (mol/s)
G: Fase gás
h_E: Altura da espuma sobre o prato (m)
L: Líquido
N: Fluxo de transferência de massa entre as fases (mol/s)
P: Produto de reação
Q^G: Calor removido da fase gasosa (j/s)
Q^L: Calor removido da fase líquida (j/s)
R: Reagente
r: Taxa de reação (mol/m³s)
S: Fluxo (vazão mássica) na corrente lateral (mol/s)
X: Fração molar do componente na fase líquida
Y: Fração molar do componente na fase gasosa

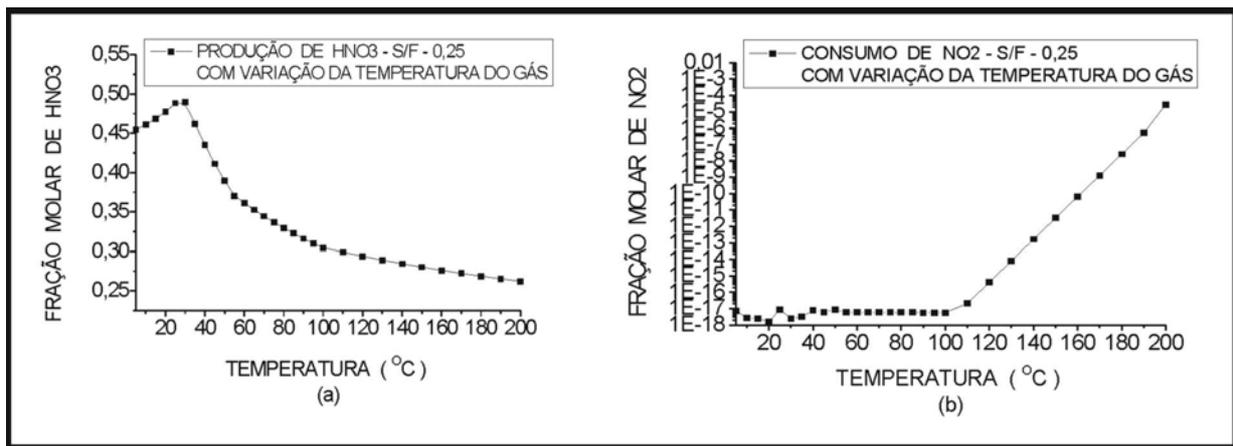


Figura 5 - Influência da temperatura de alimentação da fase gasosa

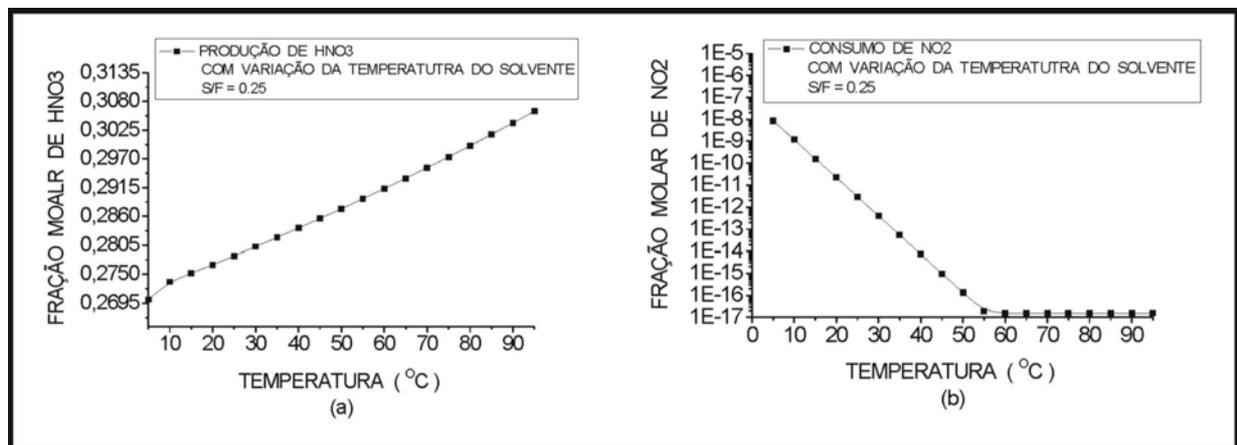


Figura 6 - Influência da temperatura de alimentação da fase líquida no processo de absorção

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

δ_L : Espessura do filme (m)
 ϵ_L : Fração do líquido na espuma
 Ω : Seção transversal da coluna (m²)

Subscritos

j: Componente
 B: Base
 n: Estágio
 T: Topo

Sobrescritos

G: Fase Gás
 L: Fase Líquido

REFERÊNCIAS

ANDREW, S. P. S.; HANSON, D. *The dynamics of nitrous gas absorption*. Chemical Engineering Science, v. 14, 1961.
 AZEVEDO, G. G. e CRUZ, S. L., *Análise de uma Coluna de Absorção de CO₂ em uma Solução de Monoetanolamina*. Anais do Congresso Bra-

sileiro de Engenharia Química (COBEQ), 1, p. 852, São Paulo, 1994.

BARROS, A. A. C. *Desenvolvimento de modelo de estágios de não equilíbrio e proposição de correlações de eficiência para os processos de destilação convencional e extrativa*. Tese de Doutorado em, UNICAMP, 1997.

BARROS, A. A. C.; MACIEL, M. R., *Desenvolvimento de uma Correlação para a Avaliação da Eficiência nas Colunas de Destilação Extrativa*; 1º Congresso de Engenharia de Processos do Mercosul, Setembro, Bahia Blanca – Argentina, 1997a.

BARROS, A. A. C.; MACIEL, M. R., *Aplicação da Modelagem de Estágios de Não Equilíbrio na Avaliação da Correlação da Eficiência das Colunas de Destilação*; XVIII Congresso Íbero Latino-Americano de Métodos Computacionais em Engenharia – Brasília, 1997b

BARROS, A. A. C.; MACIEL, M. R., *Aplicação da Modelagem de Estágios de Não Equilíbrio na Avaliação da Nova Correlação da Eficiência das Colunas de Destilação*, 12º. Congresso Brasileiro de Engenharia Química – Porto Alegre, 1998.

BARROS, A. A. C.; MACIEL, M. R., *Relation Between the Surface Tensions and Mass Transfer Efficiency in the Distillation Processes*; 6 th World Congress of Chemical Engineering; Melbourne, 2001.

COUNCE, R. M.; PERONA, J. J. *Gaseous Nitrogen Oxide Absorção in a Sieve Plate Column*. Ind. Eng. Chem. Fund., 18, p. 400, 1979.

DEKKER, W. A.; SNOECK, E.; KRAMERS, H. *Chemical Engineering Science*, v. 11, p. 61, 1959.

DE LEYE, L.; FROMENT, G. F., *Rigorous Simulation and Design of Columns for Gas Absorção and Chemical Reaction – I: Packed Columns*, Computers Chemical Engineering, 10, n 5, p. 493, 1986a.

DE LEYE, L.; FROMENT, G. F., *Rigorous Simulation and Design of Columns for Gas Absorção and Chemical Reaction – II: Plate Columns*. Comp. Chem. Engng., 10, n. 5, p. 505, 1986b.

FROMENT, G. F.; BISCHOFF, K. B., *Chemical Reactor Analysis and Design*, 2 ed., New York, John Wiley, p.664, 1990.

GOMIDE, R., Operações Unitárias, 2 ed., São Paulo, Gomide, 160p, 1980.

HIGLER, A.; TAYLOR, R.; KRISHNA, R., *Modeling of a Separation Process Using a Nonequilibrium Stage Model*, Computers Chemical Engineering, 22, p. S111, 1998.

HOLMA, H.; SOHLO, J., *A Mathematical Model for an Absorção Tower of Nitrogen Oxides in Nitric Acid Production*. Comput. Chem. Eng., 3, p. 135, 1979.

KELLY, R.M., ROUSSEAU, R.W. and FERRELL, J.K., *Design of Packed, Adiabatic Absorbers: Physical Absorção of Acid Gases in Methanol*. Ind. Eng. Process Des. Dev. n.º. 23, 1984.

LEITE, A.B., *Processos de Absorção de gases: Simulação Numérica e Relevância Ambiental*. Dissertação de Mestrado em 2001, FURB, 2001.

LEWIS, W.K., *The Efficiency and Design of Rectifying Columns for Binary Mixtures*, Ind. Eng. Chem. 4(6), p. 492, 1992.

PERRY, D., NUTTER, D.E. and HALE, A., *Liquid Distribution for Optimum Packing Performance*, Chem. Eng. Prog., p. 30, 1984.

PERRY, R.H., CHILTON, C.H., *Manual de Engenharia Química*, Rio de Janeiro, Guanabara Dois, 1986.

POWERST, M. F.; et al. *A Nonequilibrium Stage Model of Multicomponent Separation Processes: V Computational Methods for Solving the Model Equations*, Computer Chemical Engineering, 12, n 12, p. 1229, 1998.

STOCKAR, U. V.; BOURNE, J. R.; COGCAN, *Gas Absorção with Heat Effects I A New Computational Method*, Ind. Eng. Chem. Process Des. Develop., 13, n 2, p. 115, 1974.

SUCHAR, N. J.; JOSHI, J. B. *Simulation an optimization of NO_x absorption system in nitric acid manufacture*. AIChE Journal. 994. v. 40, n. 6, p. 944-956, 1994.

WIEGAND, K. H.; SCHEIBLER, E.; THIEMANN, M., *Computations for Plate Columns for NO_x Absorção by a Stage to Stage Method*. Chem. Eng. Technol., 13, p. 289, 1990.

Endereço para correspondência:

André Búrgio Leite
UnC - Universidade do Contestado-
Campus de Concórdia - SC
Coord. do Curso de Engenharia
Ambiental
Rua Victor Sopelsa, 3000
89700-000 Concórdia - SC - Brasil
Tel: (49) 441-1019
Fax: (49) 441-1020
E-mail: ableite@uncnet.br



LOJA DE LIVROS ESPECIALIZADA EM SANEAMENTO E MEIO AMBIENTE

O Fundo Editorial dispõe de mais de 150 títulos, mantendo-se sempre atualizado com pesquisas diárias de novos títulos em editoras e universidades.

Listagem organizada por assunto e/ou
 tabela de preços:
www.abes-dn.org.br
livraria@abes-dn.org.br