



# 2º CONGRESSO BRASILEIRO DE P&D EM PETRÓLEO & GÁS

## RECONSTRUÇÃO DE IMAGENS TOMOGRÁFICAS APLICADA NA MODELAGEM DO *RISER* DE UMA UNIDADE FCC

Tania M. Centeno<sup>1</sup>, Mauren A. de Souza<sup>1</sup>, Marcelo K. Felisberto<sup>1</sup>, Hugo R. Schelin<sup>1</sup>,  
Sergei A. Paschuk<sup>2</sup>, Ivan Evsev<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CEFET-PR/CPGEI - Av. Sete de setembro, 3165, (mezzadri,mauren@cpgei.cefetpr.br)

<sup>2</sup>CEFET-PR/Laboratório de Tomografia Computadorizada- Av. Sete de setembro, 3165,  
(sergei.evsev@cefetpr.br)

**Resumo** – O estudo do escoamento gás-sólido, particularmente de catalisador de FCC em risers e regeneradores, é de grande interesse para a comunidade científica e industrial. A partir deste estudos vem a possibilidade de maximizar a produção de combustíveis (gasolina, diesel) ou de olefinas leves (matéria para a indústria petroquímica), a partir da escolha de um tipo mais adequado de catalisador e da realização de ajustes de condições operacionais.

A Petrobrás vem trabalhando em cooperação com Grupos de Universidades na modelagem e simulação do *riser* de uma unidade FCC. Esta cooperação tem muitas vantagens, entre elas, permitir uma maior interação técnica entre causas e efeitos, melhor adequação para as necessidades da produção, além das vantagens econômicas e ambientais. O incremento no conhecimento da tecnologia de FCC, implica em obter um melhor rendimento do processo, que se traduz em economia na produção de refinarias de petróleo. Este artigo expõe uma proposta para investigar o *riser* de unidade de FCC, por meio de radiação gama, com o auxílio de técnicas de processamento de imagens e de reconstrução tridimensional. O resultado é um modelo tridimensional baseado nos parâmetros fluidodinâmicos de cada seção transversal do *riser* como densidade e distribuição gás-sólido.

Palavras-Chave: *riser*; diagnóstico, FCC, reconstrução 3D, modelagem

**Abstract** – The research about gas-solid flow in risers of FCC is an important issue to the scientific and industrial community. From these studies it becomes possible to maximise the production of fuels, oil derivatives or other materials from petroleum industry through a more suitable kind of catalytic converters and settings of operational conditions.

In order to reach this purpose, PETROBRÁS works with the co-operation of universities groups in modelling and simulation of the FCC gas oil riser. This co-operation has many advantages: to allow a greater technical interaction between causes and effects, to get suited techniques to the production requirements besides economical and environmental advantages. The knowledge of FCC technology can provide a substantial contribution to the product development process in petroleum refineries. This paper describes a technique to survey the FCC gas oil riser by means of gamma ray computed tomograph images applied to digital image processing and 3d reconstruction techniques. The result is a 3D model based on hydrodynamic parameters as density and gas-solid distribution at any desired riser cross-section.

Keywords: riser, diagnostic, FCC, 3D reconstruction, modeling

## 1. Introdução

O craqueamento catalítico fluído (FCC) de hidrocarbonetos é um processo universalmente utilizado no refino de petróleo. O processo de FCC tem uma operação cíclica onde as partículas do catalisador (tamanho médio em torno de 70  $\mu\text{m}$ ) circulam entre um reator de leito fluidizado de transporte em fase diluída, denominado de *riser* e um reator de leito fluidizado de transporte de fase densa, denominado de regenerador (Margraf et al., 2001).

O estudo do escoamento gás-sólido, particularmente do catalisador de FCC em *risers* e regeneradores, é de grande interesse para a comunidade científica e industrial. Isto se deve ao fato de ser o FCC o principal produtor de gasolina, tanto de forma direta como indireta, através de outras correntes produzidas com matérias-primas geradas pelo próprio FCC, tais como oxigenados, alquilados ou isomerizados. A versatilidade das unidades de FCC permite que se possa operá-las de diferentes maneiras, de modo que, mediante o tipo de catalisador utilizado e ajustes de condições operacionais, é possível maximizar a produção de gasolina, de diesel ou olefinas leves (matéria para a indústria petroquímica). Certamente, modelos matemáticos que descrevam com maior fidelidade o processo FCC, requerem medidas precisas da fluidodinâmica (Evsev et al., 2001).

Ao lado da importância econômica e tecnológica do refino do petróleo, estão as exigências e a preocupação com o meio ambiente (King, 1992). A possibilidade de obtenção de perfil de produção mais adequado, reduz a geração de efluentes, tanto de origem sólida quanto líquida e gasosa. Combustíveis mais limpos significa também menos poluição.

Este artigo expõe uma proposta para investigar o *riser* de unidade de FCC por meio de radiação gama com o auxílio de técnicas de processamento e reconstrução tridimensional de imagens tomográficas.

A PETROBRÁS vem se capacitando para a realização de diagnóstico em *risers* de FCC. Este projeto é uma proposta de modelagem para a investigação do *riser* de uma unidade de FCC por meio da radiação gama. O desenvolvimento desta técnica no país em conjunto com a PETROBRÁS, tem muitas vantagens, entre elas, permitir uma maior interação técnica entre causas e efeitos, melhor adequação para as necessidades da produção, além das vantagens econômicas. Este trabalho se insere numa área onde a PETROBRÁS vem trabalhando em cooperação com Grupos de Universidades na modelagem e simulação do *riser* de uma unidade de FCC. A obtenção dos dados experimentais propostos no projeto seriam utilizados na validação de modelos matemáticos que descrevem a fluidodinâmica do *riser*.

## 2. Tomografia computadorizada

A tomografia computadorizada foi criada no início da década de 70 pelo engenheiro inglês Geoffrey Housefield, associando a emergente tecnologia da computação com o antigo equipamento de tomografia utilizado em radiologia desde os anos 20. Esta nova técnica revolucionou o campo da ciência, no diagnóstico por imagem, a tal ponto que valeu ao seu criador o prêmio Nobel de Medicina. Ela permitiu visualizar estruturas que não eram identificadas pela radiografia convencional. Uma imagem de raio-X convencional tem uma variação de 20 a 30 escalas de cinza, enquanto que uma imagem tomográfica feita numa máquina moderna, possui variações que chegam a 200 escalas de cinza.

Embora o diagnóstico médico por imagem permaneça ainda a ênfase maior desta área, há um crescente interesse no ramo das aplicações industriais, sobretudo em processos executados pela indústria petrolífera. Tal técnica está se tornando uma ferramenta fundamental no setor produtivo, onde cada vez mais a indústria está preocupada com a qualidade, tanto em relação ao produto final e sua aceitação pelo mercado, quanto pelo processo de otimização da manufatura (Grassler e Wirth, 1999). A agregação de alta tecnologia aos processos industriais, principalmente em mecânica de precisão, materiais e micro-eletrônica, obriga o fabricante a recorrer a técnicas avançadas de inspeção e controle através de ensaios não destrutivos (END).

Com o auxílio do tomógrafo, pode-se, por meio de raios gama, obter imagens da estrutura interna do produto, a fim de detectar os defeitos de materiais (micro-rachaduras, fissuras, porosidade, falhas, inclusões, etc.). Uma outra aplicação é a determinação da distribuição catalisadora em diferentes pontos de altitude em oleodutos (Dudukovic, 2001). Bartholomew e Casagrande (1957) foram os primeiros a aplicar esta técnica em leitos fluidificados na investigação da distribuição de sólidos por meio da absorção de raios gama usando uma fonte de  $\text{Co}^{60}$ . Nas últimas duas décadas, a tomografia computadorizada tornou-se uma ferramenta amplamente disponível, tendo aumentado muito a experiência na sua utilização. Com sua tecnologia moderna e avançada, a investigação tomográfica se destaca entre outros métodos de diagnóstico e oferece uma poderosa ferramenta em processos de otimização. No entanto, os resultados destas pesquisas permanecem em segredo pois são considerados parte essencial do *know-how* de determinadas empresas (Werther, 1999).

Tais métodos além de permitirem um aperfeiçoamento no processo de produção, como inspeção interna de peças e detecção de falhas em materiais, podem ajudar a prevenir problemas maiores, ou até mesmo o chamado *shutdown*, que seria a interrupção da produção devida a problemas operacionais. No caso de uma refinaria petrolífera, um *shutdown* teria um alto custo, representando um grande prejuízo. Uma das técnicas de diagnóstico para se evitar isso, seria "escanear" o *riser*, onde ocorrem as reações de craqueamento. A técnica em questão, permitirá superar os problemas de fluxo nas medições, aperfeiçoar o processo de craqueamento e otimizar o desempenho do *riser*.

A utilização de sistemas de gamagrafia em END exige um programa de reconstrução de imagens que tenha a capacidade de armazenar e processar grandes quantidades de dados em tempo real. Este programa requer sistemas computacionais de grande capacidade de processamento (tamanho de RAM, tamanho do disco rígido, frequência de processador, recursos de vídeo, etc.), semelhantes às máquinas utilizadas atualmente por sistemas médicos, que vem em conjunto com o equipamento tomográfico, de preço muito elevado, adaptado para fins diagnósticos, cujo software já é compilado e enclausurado no sistema que não permite acesso externo.

De um modo geral, um tomógrafo industrial de raios gama poderia ser dividido nos seguintes componentes:

- sistema mecânico do tomógrafo;
- fonte e detectores de radiação;
- sistema eletrônico de processamento e transmissão de sinais;
- sistema computacional de controle de movimentos, aquisição e processamento de dados, e de reconstrução de imagem.

O objetivo principal dessa proposta é o desenvolvimento de um *software* de processamento digital e de reconstrução de imagens tomográficas e visualização, que possa ser utilizado de maneira flexível nas diversas linhas de pesquisa e ensaios não destrutivos da área de mecânica de precisão e de materiais que envolvam a gamagrafia computadorizada, principalmente na indústria petrolífera.

### 3. Metodologia

Um dos objetivos principais da gamagrafia é produzir imagens de cortes axiais transversos para determinar a distribuição de algum tipo de material em alguma região de interesse, através de um conjunto de medidas realizadas por sensores que são uniformemente distribuídos. A partir destas medidas é possível derivar outros parâmetros de interesse (York, 2001). A fase de distribuição em uma seção transversal de um *riser* pode ser medida através de imagens obtidas por um tomógrafo de raios gama. O princípio da obtenção de imagens das seções transversais da coluna do *riser* por tomografia computadorizada é simples. A partir da medida de atenuação dos fluxos que passam através da coluna, a imagem pode ser mais ou menos escura. Esta variação dá uma idéia da distribuição dos fluxos que atravessam a coluna naquele ponto. Como a resolução temporal é baixa (em torno de 45 minutos por seção transversal) é possível determinar apenas a densidade média da distribuição de fluxo (Dudukovic, 2001).

As medições são não invasivas, ou seja, os sensores de aquisição de dados são distribuídos no exterior da parede do objeto a ser investigado, no caso, os *risers*. A idéia básica é instalar um número de sensores em torno do *riser*, do lado oposto, instala-se uma fonte emissora de raios gama. A intensidade da radiação será captada pelos detectores numa determinada elevação, como se fosse uma “fatia” transversal (Figura 1). Este procedimento revela informações sobre a densidade do material no interior do *riser* no local da medida. A intensidade das radiações são coletadas pelos sensores distribuídos e criam uma projeção dos dados que são armazenados e podem ser visualizados em um computador (Figura 2). Posteriormente estas “fatias” serão utilizadas para a construção de um modelo tridimensional que permite uma melhor compreensão do comportamento dos fluidos ao longo do comprimento do *riser*.

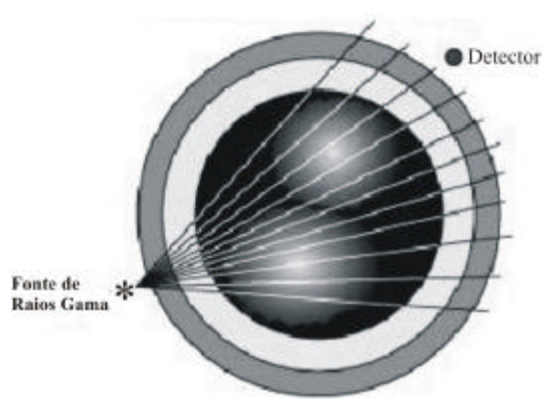


Figura 1. Disposição da fonte de raios gama e dos detectores.

A partir de um conjunto de projeções dos dados pode-se obter um “quadro” dos dados obtidos que, após a reconstrução, são traduzidos em uma imagem de uma seção transversal do *riser* representando a distribuição de densidade do material interno. Cada seção transversal é subdividida em uma matriz de elementos de volume (voxels). A imagem é reconstruída em um computador (Figura 3). O brilho, ou escala de cinza de cada pixel da imagem representa o coeficiente de atenuação linear médio do voxel correspondente.

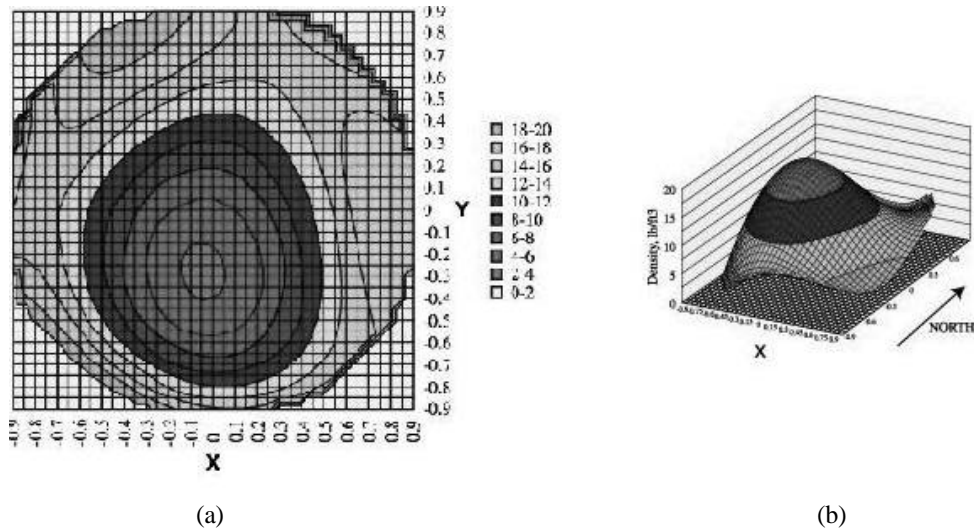


Figura 2. (a) Disposição bidimensional de uma “fatia” transversal do *riser*, com seus parâmetros e densidades. (b) a mesma “fatia” apresentada em formato tridimensional em relação a densidade do fluxo.

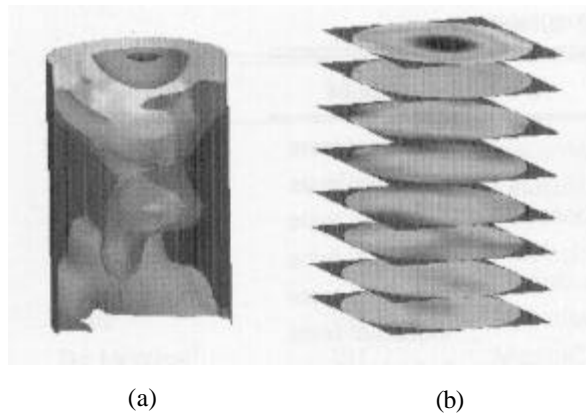


Figura 3. Imagens das seções transversais do *riser* (a) Reconstrução tridimensional. (b) Sequência de “fatias”.

## 4. Resultados

### 4.1. Processamento de imagens

Após a aquisição das imagens das seções transversais em pontos pré-determinados do *riser*, estas devem ser tratadas através de técnicas de processamento digital de imagens, para que sejam padronizadas e possam ser devidamente utilizadas no processo de reconstrução tridimensional. Nesta etapa, filtros podem ser aplicados a fim de eliminar ruídos e uniformizar a imagem, se necessário. A Figura 4 ilustra uma imagem proveniente de um protótipo experimental de *riser*. A Figura 5 ilustra a imagem após a aplicação do filtro da mediana. Observa-se, de forma mais clara, os contornos com níveis de cinza que variam em função da densidade de fluxo dos fluidos presentes.

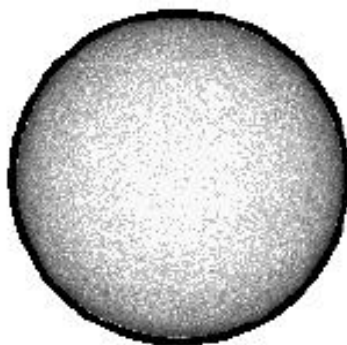


Figura 4. Imagem de uma seção transversal do *riser* (Grassler e Wirth, 1999)

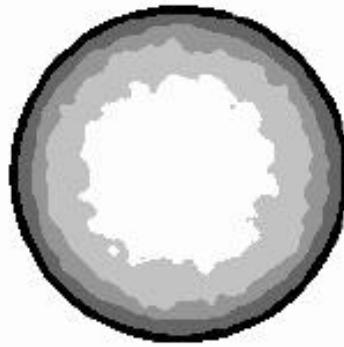


Figura 5. Imagem da Figura 4 após aplicação do filtro da mediana

Após essa etapa, extrai-se de cada imagem, o conjunto de contornos obtidos de acordo com os níveis de cinza. O algoritmo de limiarização de *Otsu* (Parker, 1997) foi usado para segmentar os contornos deixando a imagem com apenas dois níveis de cinza (branco e preto). Em seguida, o esqueleto de cada contorno é gerado através do algoritmo de *Stentiford* (Parker, 1997). Desta forma, cada contorno possuirá a largura de apenas um pixel, facilitando a reconstrução das superfícies. Em seguida cada contorno recebe um rótulo que o identifica. A imagem resultante é ilustrada na Figura 6.

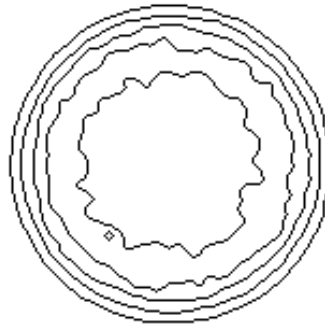


Figura 6- Imagem resultante após o pré-processamento

#### 4.2 Reconstrução tridimensional

Uma vez que os contornos de todos os cortes transversais tenham sido extraídos, registrados e tratados a superfície entre eles pode ser reconstruída. A reconstrução tridimensional é realizada através de uma técnica que reconstrói a superfície gerada entre as imagens de duas seções transversais. No caso, foi utilizada a técnica de triangulação entre superfícies. A triangulação consiste na construção de faces triangulares entre dois contornos situados em fatias diferentes, completando o espaçamento entre elas. Tal técnica gera uma superfície entre todas as seções transversais adquiridas. Tal técnica é detalhada em Souza (2002). Um exemplo da reconstrução tridimensional entre duas fatias utilizando a técnica de triangulação é mostrada na Figura 7.

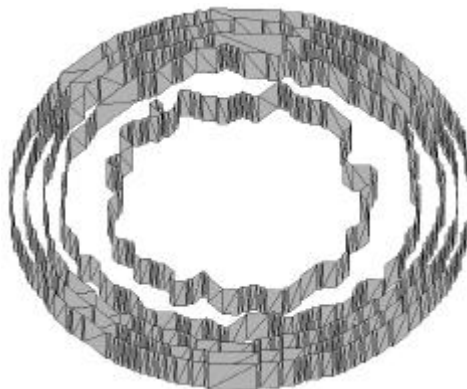


Figura 7- Reconstrução 3D entre duas seções transversais do riser

## 7. Conclusões

O modelo desenvolvido é uma ferramenta que possibilita a dinamização e a otimização das pesquisas que envolvam gamagrafia computadorizada, seja na concepção e construção de sistemas para aquisição de imagens, seja na adaptação e utilização de sistemas já existentes. O método proposto proporciona imagens confiáveis da distribuição da densidade de seções transversais em sistemas opacos e demonstrou resultados satisfatórios até o momento, embora a parte de visualização ainda não esteja concluída.

As reconstruções tridimensionais obtidas permitem a análise da distribuição interna do riser. No entanto, o principal objetivo a ser atingido é um incremento no conhecimento da tecnologia de FCC. Tal possibilidade certamente implica em obter um melhor rendimento do processo, que se traduz em economia na produção de refinarias de petróleo. Uma economia mínima pode, neste caso, representar significativo montante de recursos.

## 7. Agradecimentos

Agradecemos o apoio financeiro da Agência Nacional do Petróleo - ANP - e da Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP - por meio do Programa de Recursos Humanos da ANP para o Setor Petróleo e Gás - PRH-ANP/MCT (PRH10-CEFET-PR), ao CNPq pelas bolsas de pesquisa e a PETROBRÁS.

Agradecemos a colaboração dos colegas de trabalho do Laboratório de Tomografia Computadorizada do CEFET-PR.

## 8. Referências

- BARTHOLOMEW, R.N. e CASAGRANDE, R.M. Measuring solids concentration in fluidized systems by gamma-ray absorption. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, v. 49, n. 3, p. 428-431, 1957.
- EVSEV, I., PASCHUK, S.A., SCHELIN H.R., KLOCK, M.C.L., CENTENO, T.M The problems of riser tomographic imaging and possible solutions. *Anais do I Encontro dos Programas de Recursos Humanos em Petróleo e Gás Natural do Paraná PRH-ANP*. CD-ROM, 2001.
- KING, D. Chemical Reactor Technology for Environmentally Safe Reactor and Products. *NATO ASI Series E, Kluwer: Dordrecht*, 225 (17), 1992.
- GRASSLER, T., WIRTH, K.-E. X-ray Computer Tomography - Potential and Limitation for the Measurement of Local Solids Distribution in Circulating Fluidized Beds. *In Proceedings of 1st World Congress on Industrial Process Tomography*, p. 402-409, 1999.
- MARGRAF, D.,CENTENO, T.M., PASCHUK, S.A., EVSEV, I., SCHELIN H.R., Desenvolvimento da técnica de diagnóstico de FCC por gamagrafia. *Anais do I Encontro dos Programas de Recursos Humanos em Petróleo e Gás Natural do Paraná PRH-ANP*. CD-ROM, 2001.
- PARKER, R. *Algorithms for Image Processing and Computer Vision*. John Wiley & Sons, New York, 1997.
- SOUZA, M. A., *Reconstrução 3D de Imagens Tomográficas Aplicadas à Prototipagem Rápida*. Dissertação de Mestrado, CEFET-PR, 2002.
- YORK, T. Status of electrical tomography in industrial applications. *Electronic Imaging*, v. 10, n. 3, p. 608-619, 2001.
- WERTHER, J. Measurement techniques in fluidized beds. *Powder Technology*, v. 102, p. 15-36, 1999.