



\* B R 1 0 2 0 2 2 0 2 0 5 9 8 A 2 \*

República Federativa do Brasil

Ministério do Desenvolvimento, Indústria,  
Comércio e Serviços

Instituto Nacional da Propriedade Industrial

(21) BR 102022020598-1 A2

(22) Data do Depósito: 11/10/2022

(43) Data da Publicação Nacional:  
24/04/2024

(54) **Título:** MODELO VIRTUAL 3D DE UNIDADE DE CRAQUEAMENTO CATALÍTICO FLUIDIZADO COM SIMULAÇÃO DE FLUXO DE PROCESSO DE ESCOAMENTO EM CICLO FECHADO

(51) **Int. Cl.:** G06T 17/10; G06T 19/20; B01J 19/00; B01J 8/18; C10G 11/00; (...).

(52) **CPC:** G06T 17/10; G06T 19/20; B01J 19/00; B01J 8/18; C10G 11/00; (...).

(71) **Depositante(es):** UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO.

(72) **Inventor(es):** LEANDRO CLAUDINO DA SILVA; EUDES BERTONY VIEIRA; CARLOS COSTA DANTAS; SILVIO DE BARROS MELO; VICTOR HUGO FARIAS FERREIRA DA SILVA; MILTON DOS SANTOS VIANA.

(57) **Resumo:** MODELO VIRTUAL 3D DE UNIDADE DE CRAQUEAMENTO CATALÍTICO FLUIDIZADO COM SIMULAÇÃO DE FLUXO DE PROCESSO DE ESCOAMENTO EM CICLO FECHADO. Na indústria, a constante criação e modificação de projetos pilotos e protótipos para verificação das características físicas e operacionais do equipamento faz com que os custos de desenvolvimento e aperfeiçoamento de novos produtos seja elevado. A literatura demonstra a importância existente na realização de simulações através de recursos computacionais, seja para análise da resistência ou para o estudo da fluídodinâmica. Portanto, o presente trabalho refere-se a criação de unidade piloto virtual 3D de FCC, com as mesmas características físicas da unidade experimental presente no DEN e ainda a simulação das condições de operação iguais ao da unidade experimental. Os dados de entrada são vazão de entrada do ar, vazão de entrada de sólidos, pressão, densidade e tamanho da partícula. Com as simulações realizadas, conseguiu-se a convergência dos valores de pressão e vazão, para valores próximos aos medidos na unidade experimental nos mesmos pontos de medição através da transmissão gama. Também conseguiu-se obter valores de concentração de sólidos e velocidades de sólidos aproximados ao verificados na unidade física, validando assim as simulações computacionais. A unidade é composta por (...).

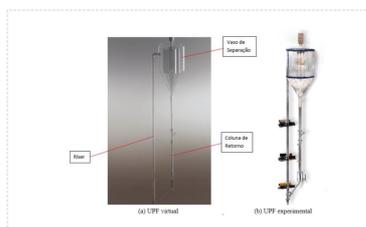


Figura 2

## **MODELO VIRTUAL 3D DE UNIDADE DE CRAQUEAMENTO CATALÍTICO FLUIDIZADO COM SIMULAÇÃO DE FLUXO DE PROCESSO DE ESCOAMENTO EM CICLO FECHADO**

### **Campo da invenção**

[001] Refinamento de petróleo, craqueamento de petróleo, craqueamento catalítico fluidizado, experimentos acadêmicos, modelagem computacional, simulação computacional, engenharia mecânica, projeto mecânico.

### **Fundamentos da invenção**

[002] O invento trata-se de um modelo digital 3D de uma unidade de craqueamento catalítico fluidizado. Este invento permite a realização de processos fluidodinâmicos do sistema através de simulações computacionais em ciclo completo (full loop), reduzindo tempo e custos destes experimentos. Como desafios temos o objetivo de utilizar esta unidade 3D para simular processos termodinâmicos, o que elevaria ainda mais o patamar do invento.

Trabalhos científicos similares:

“DANTAS, C. C.; MOURA, A. E.; LIMA FILHO, H. J. B.; MELO, S. B.; SANTOS, V. A.; LIMA, E. A. O. Uncertainty evaluation by gamma transmission measurements na CFD model comparison in FCC cold pilot unit, International Journal of Metrology and Quality Engineering, vol. 4, p. 9-15, 2013.” – Este trabalho apresenta modelação e simulação de uma pequena parte da unidade experimental, limitada ao riser. Os resultados não envolvem a avaliação em toda unidade.

“LIMA, A. C.; SANTOS, V. A.; DANTAS, C. C.; FINKLER. Análise da distribuição do tamanho do catalisador em um riser de unidade de craqueamento catalítico fluido (FCC) de petróleo. In: XVII Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ, Recife/PE, 2008.” – Este trabalho apresenta análise apenas experimental do processo.

“LIMA FILHO, H. J. B. Validação de modelos CFD bi e tridimensionais de um riser piloto a frio com auxílio de medidas de transmissão gama. Recife, 2014. 121p. Tese de Doutorado – Departamento de Engenharia Química - Universidade Federal de Pernambuco.” – Este trabalho apresenta modelação e simulação de uma pequena parte da unidade experimental, limitada ao riser. Os resultados não envolvem a avaliação em toda unidade.

“YIN, S.; JIN, B.; ZHONG, W.; LU, Y.; SHAO, Y.; LIU, H. Gas-solid flow behavior in a pressurized high-flux circulating fluidized bed riser. Chemical Engineering Communications, v. 201, p. 352-366, 2013.” - Este trabalho apresenta simulação de uma parte maior da unidade, mas sem considerar o ciclo fechado. Os resultados aqui apresentado não são conclusivos e reprodutivos.

[003] Otimizações em processos de craqueamento catalítico fluidizado são extremamente custosos e difíceis de serem implementados por dificuldades operacionais. O invento apresentado facilita otimizações nos processos de craqueamento, reduzindo custos e tempos. Mudanças que levariam anos para serem implementadas em unidades de craqueamento podem ser realizadas em dias na unidade virtual 3D. Os trabalhos desenvolvidos até o atual momento não conseguem obter resultados que sejam possíveis de comparar e aplicar com dados de unidades experimentais e industriais.

### **Breve descrição dos desenhos**

[004] Seguem descrições dos desenhos:

A Figura 1 apresenta as vistas frontal, superior e isométrica da unidade virtual desenvolvida.

A Figura 2 apresenta a unidade virtual e a unidade experimental lado a lado.

A Figura 3 apresenta a unidade virtual junto com a estrutura metálica de sustentação.

A Figura 4 apresenta a distribuição longitudinal e radial de um determinado parâmetro na unidade virtual após realização da simulação, com escala de valores.

A Figura 5 apresenta a simulação de fluxo, mostrando o comportamento do ar e catalisador dentro da unidade.

A Figura 6 apresenta a distribuição de pressão ao longo do riser.

A Figura 7 apresenta a distribuição de pressão no final do riser, na curva 90°, no filtro e na câmara de distribuição.

A Figura 8 apresenta a tabela de pressão medida nas unidades experimentais e virtual, validando os resultados da virtual.

A Figura 9 apresenta o gráfico de distribuição de pressão ao longo do riser até a câmara de separação.

A Figura 10 apresenta a secções radiais da concentração de sólidos ao longo do riser medido na unidade virtual.

A Figura 11 apresenta as tabelas das concentrações de sólido calculada com base em dados experimentais e medidas na unidade virtual.

A Figura 12 apresenta a tabela com cálculo da taxa de circulação de sólidos

A Figura 13 apresenta a tabela com taxa de circulação de sólidos calculada e simulada.

### **Descrição da invenção**

[005] O invento trata-se de uma unidade virtual 3D que caracteriza um modelo digital de uma unidade piloto de Craqueamento Catalítico Fluidizado – FCC instalada no DEN (Departamento de Energia Nuclear). Este tipo de equipamento é utilizado no refinamento de petróleo. O modelo virtual aqui apresentado possui todas as características geométricas e dimensionais do modelo físico presente no DEN (dimensões e detalhes), bem como sua simulação de fluxo de partículas representa a mesma condição operacional da unidade física. O modelo virtual é composto por 3 regiões principais, sendo elas o riser (local onde ocorre a interação direta do fluxo de ar com as partículas sólidas), a câmara de separação (local com 04 ciclones para separação de ar e catalisador e um filtro na região superior para saída do ar) e a coluna de retorno (na qual as partículas são novamente condicionadas e retornam para o ciclo fechado). O objetivo da unidade virtual é simular a fluidodinâmica do processo e avaliar os parâmetros básicos da fluidodinâmica. Na região inferior do riser é injetado o ar e as partículas sólidas de catalisador descem por gravidade pela coluna de retorno. O ar e o catalisador se misturam e ascendem ao longo do riser, onde ocorrem as relações fluidodinâmicas e é possível serem medidos os parâmetros básicos. Ao longo do riser existem pontos específicos de medição na unidade física, porém na unidade virtual é possível aferir parâmetros como velocidade de sólido (m/s), concentração de

sólidos ( $\text{kg/m}^3$ ) e fração volumétrica em qualquer parte da unidade. Pelo fato da unidade virtual representar fidedignamente a unidade física, a simulação com ciclo fechado permite analisar as interações entre as partículas e garantir a mesma massa em circulação que ocorre na unidade experimental. O controle de injeção de sólidos no sistema é feito por uma válvula de injeção de sólidos (VPC) que fica localizada na parte inferior da coluna de retorno. O controle de injeção de sólidos é medido em  $\text{kg/s}$ . Na base do riser, antes da região de entrada de sólidos, existem esferas distribuidoras e uma placa de distribuição que têm o objetivo de fazer com que o ar entre no riser de forma distribuída e homogênea, assim como ocorre na unidade física e também nas unidades industriais. Na região superior do riser, na curva de  $90^\circ$ , existe um ponto de injeção de sólidos com objetivo de evitar o acúmulo de sólidos da superfície plana do tubo logo após a curva. Na câmara de separação ocorre a separação de ar e catalisador, com auxílio dos 04 ciclones, o ar escapa pelo filtro superior e o catalisador retorna por gravidade para parte inferior da câmara. Essa característica está presente na unidade física e virtual. A simulação do fluxo (ar + catalisador) também apresenta característica visual semelhante a unidade física. A modelagem 3D da unidade somada a possibilidade de simular todo fluxo em ciclo fechado, avaliando os parâmetros básicos da fluidodinâmica, faz com que a unidade virtual seja um produto inovador e revolucionário, permitindo analisar através de simulações computacionais parâmetros que só seriam possíveis serem medidos em unidades experimentais ou mesmo industriais, tornando caro e dispendiosas otimizações no processo de refinamento de petróleo.

### **Exemplos de concretizações da invenção**

[006] Seguem concretizações da invenção:

- O produto virtual desenvolvido trata-se de algo inovador e revolucionário, pois permite analisar o comportamento do sistema de forma simples e rápida quando comparada a modelos experimentais e industriais;
- A unidade piloto virtual foi desenhada seguindo todas as características geométricas da unidade piloto experimental, respeitando todas as características geométricas que são importantes para garantir a perfeita reprodução das condições iniciais de operação.

A altura total da unidade é de 7100 mm e 1800 mm de largura. O riser possui diâmetro de 4" (101,6 mm) e altura de 6370 mm.

- O modelo virtual representa de forma fidedigna as características dimensionais e operacionais de entrada, garantindo a possibilidade de comparação com os resultados obtidos entre unidade experimental e unidade virtual. A vazão mássica de entrada é de 0,1 kg/s, as vazões volumétricas de entrada são 650 m<sup>3</sup>/s, 675 m<sup>3</sup>/s e 700 m<sup>3</sup>/s. A densidade do catalisador é de 1150 kg/m<sup>3</sup>. Na unidade virtual é possível medir valores de pressão e velocidade em qualquer parte do equipamento;
- A simulações realizadas através da unidade virtual permite também reduzir significativamente os custos com modificações e otimizações/melhorias na unidade experimental. A unidade experimental possui custos de operação, enquanto o custo operacional da unidade virtual é praticamente zero.

## REIVINDICAÇÕES

1) MODELO VIRTUAL 3D DE UNIDADE DE CRAQUEAMENTO CATALÍTICO FLUIDIZADO COM SIMULAÇÃO DE FLUXO DE PROCESSO DE ESCOAMENTO EM CICLO FECHADO, utilizado no refinamento de petróleo, **caracterizado por:** a) ser composto por 3 regiões principais, sendo elas o *riser* (local onde ocorre a interação direta do fluxo de ar com as partículas sólidas), a câmara de separação (local com 4 ciclones para separação de ar e catalisador, e um filtro na região superior para saída do ar) e a coluna de retorno (na qual as partículas são novamente condicionadas e retornam para o ciclo fechado); b) simular a fluidodinâmica do processo e avaliar os parâmetros básicos da fluidodinâmica; c) na região inferior do *riser* é injetado o ar, e as partículas sólidas de catalisador descem por gravidade pela coluna de retorno; d) o ar e o catalisador se misturam e ascendem ao longo do *riser*, onde ocorrem as relações fluidodinâmicas e é possível serem medidos os parâmetros básicos; e) ao longo do *riser*, existem pontos específicos de medição na unidade física, porém, na unidade virtual é possível aferir parâmetros como velocidade de sólido (m/s), concentração de sólidos (kg/m<sup>3</sup>) e fração volumétrica, em qualquer parte da unidade; f) pelo fato da unidade virtual representar fidedignamente a unidade física, a simulação com ciclo fechado permite analisar as interações entre as partículas e garantir a mesma massa em circulação que ocorre na unidade experimental; g) o controle de injeção de sólidos no sistema, medido em kg/s, é feito por uma válvula de injeção de sólidos (VPC), que fica localizada na parte inferior da coluna de retorno; h) na base do *riser*, antes da região de entrada de sólidos, existem esferas distribuidoras e uma placa de distribuição que têm o objetivo de fazer com que o ar entre no *riser* de forma distribuída e homogênea, assim como ocorre na unidade física e também nas unidades industriais; i) na região superior do *riser*, na curva de 90°, existe um ponto de injeção de sólidos com objetivo de evitar o acúmulo de sólidos da superfície plana do tubo, logo após a curva; j) na câmara de separação ocorre a separação de ar e catalisador, com auxílio dos 4 ciclones, o ar escapa pelo filtro superior e o catalisador retorna por gravidade para a

parte inferior da câmara; k) a modelagem 3D da unidade, somado à possibilidade de simular todo o fluxo em ciclo fechado, avaliando os parâmetros básicos da fluidodinâmica, faz com que a unidade virtual seja um produto inovador e revolucionário, permitindo analisar, através de simulações computacionais, parâmetros que só seriam possíveis de serem medidos em unidades experimentais, ou mesmo industriais, tornando caras e dispendiosas as otimizações no processo de refinamento de petróleo.

**2) MODELO VIRTUAL 3D DE UNIDADE DE CRAQUEAMENTO CATALÍTICO FLUIDIZADO COM SIMULAÇÃO DE FLUXO DE PROCESSO DE ESCOAMENTO EM CICLO FECHADO**, utilizado no refinamento de petróleo, de acordo com a Reivindicação 1, **caracterizado pelo** produto virtual desenvolvido tratar-se de algo inovador e revolucionário, permitindo analisar o comportamento do sistema de forma simples e rápida, quando comparado a modelos experimentais e industriais.

**3) MODELO VIRTUAL 3D DE UNIDADE DE CRAQUEAMENTO CATALÍTICO FLUIDIZADO COM SIMULAÇÃO DE FLUXO DE PROCESSO DE ESCOAMENTO EM CICLO FECHADO**, utilizado no refinamento de petróleo, de acordo com as Reivindicações 1 e 2, **caracterizado pela** unidade piloto virtual ser desenhada seguindo todas as características geométricas da unidade piloto experimental, respeitando todas as características geométricas que são importantes para garantir a perfeita reprodução das condições iniciais de operação, sabendo-se que a altura total da unidade é de 7100 mm e 1800 mm de largura, e que o *riser* possui diâmetro de 4" (101,6 mm) e altura de 6370 mm.

**4) MODELO VIRTUAL 3D DE UNIDADE DE CRAQUEAMENTO CATALÍTICO FLUIDIZADO COM SIMULAÇÃO DE FLUXO DE PROCESSO DE ESCOAMENTO EM CICLO FECHADO**, utilizado no refinamento de petróleo, de acordo com as Reivindicações 1, 2 e 3, **caracterizado pelo** modelo virtual representar, de forma fidedigna, as características dimensionais e operacionais de entrada, garantindo a possibilidade de comparação com os resultados obtidos entre unidade experimental e unidade virtual, sabendo-se que a vazão mássica de entrada é de 0,1 kg/s, as vazões

volumétricas de entrada são 650 m<sup>3</sup>/s, 675 m<sup>3</sup>/s e 700 m<sup>3</sup>/s, a densidade do catalisador é de 1150 kg/m<sup>3</sup>, e que, na unidade virtual, é possível medir valores de pressão e velocidade em qualquer parte do equipamento.

**5) MODELO VIRTUAL 3D DE UNIDADE DE CRAQUEAMENTO CATALÍTICO FLUIDIZADO COM SIMULAÇÃO DE FLUXO DE PROCESSO DE ESCOAMENTO EM CICLO FECHADO**, utilizado no refinamento de petróleo, de acordo com as Reivindicações 1, 2, 3 e 4, **caracterizado pelas** simulações realizadas através da unidade virtual permitirem, também, reduzir significativamente os custos com modificações e otimizações/melhorias na unidade experimental, sabendo-se que a unidade experimental possui custos de operação, enquanto o custo operacional da unidade virtual é praticamente zero.

## DESENHOS

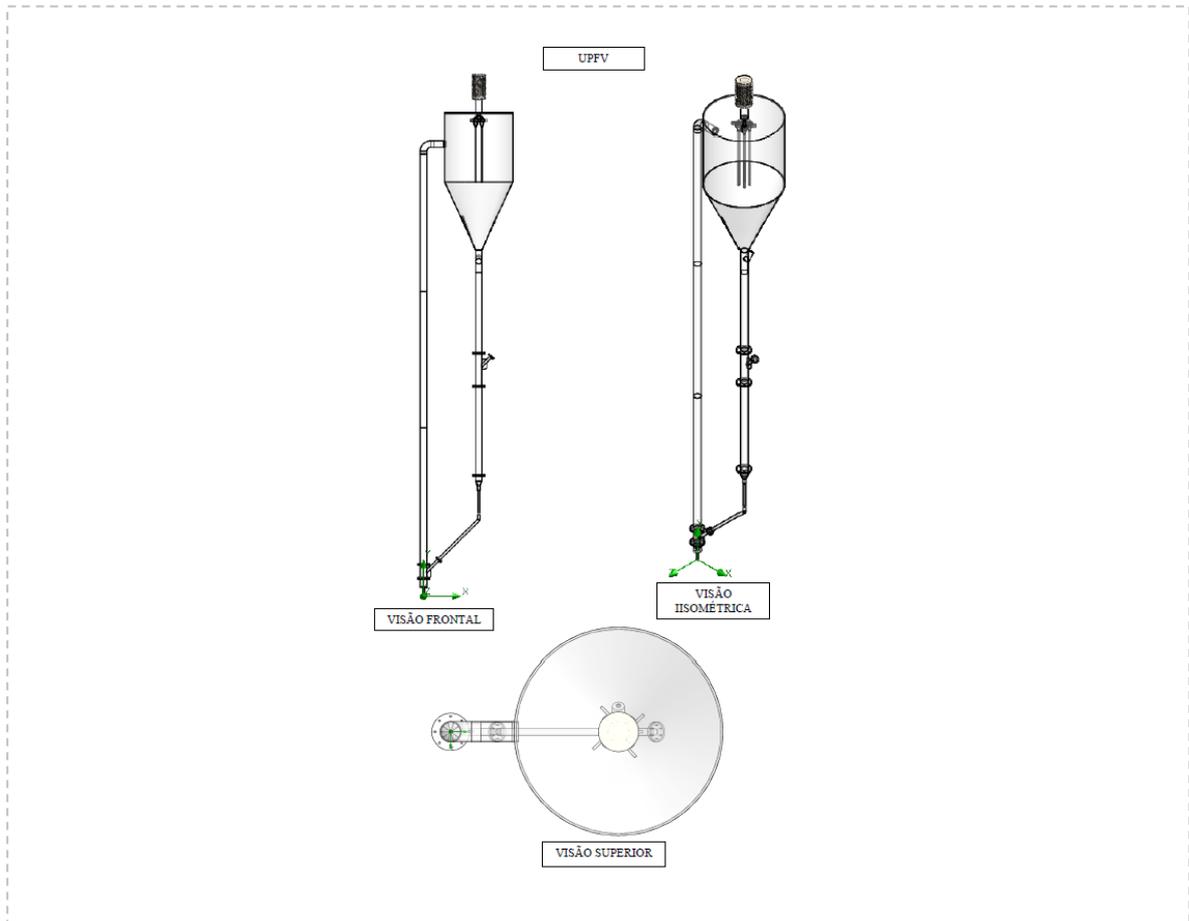


Figura 1

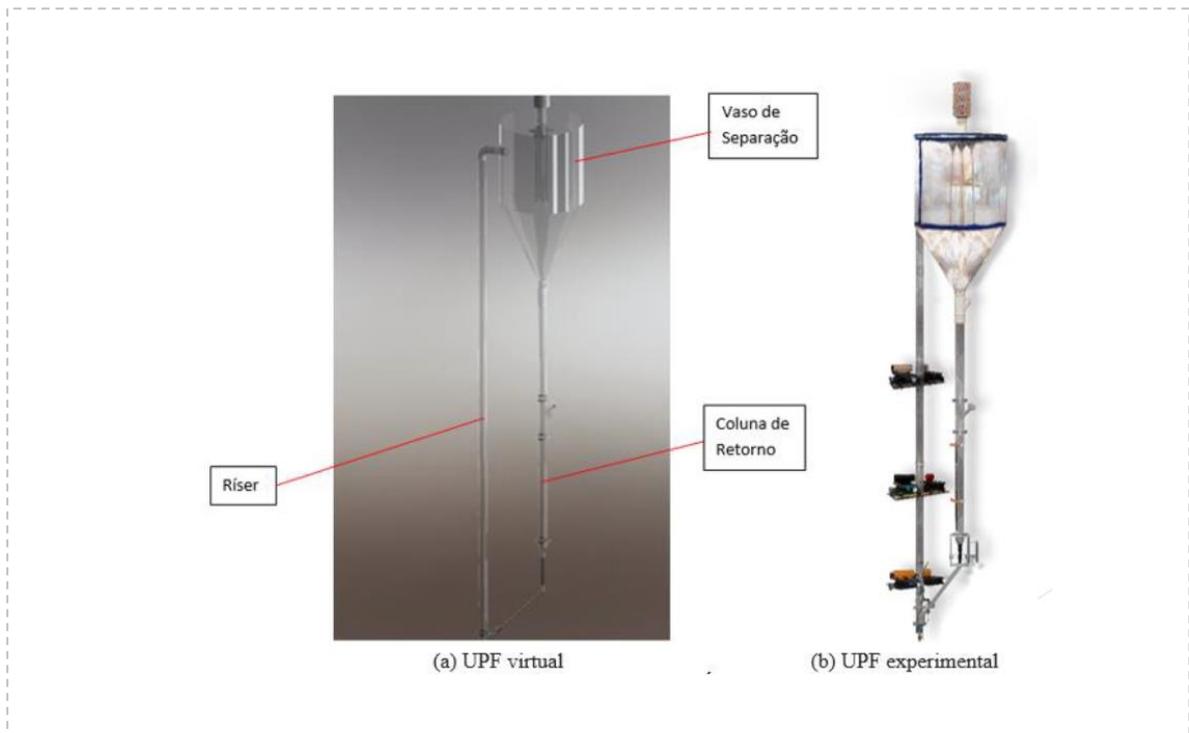


Figura 2

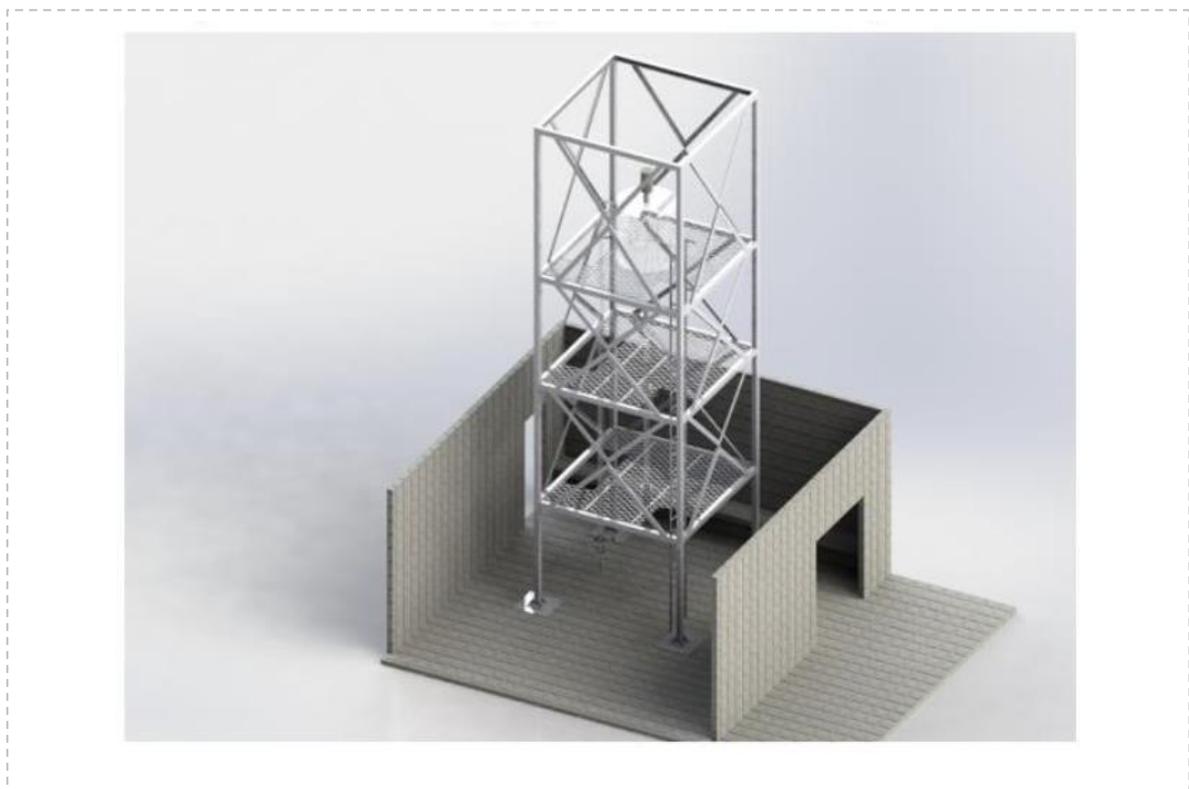


Figura 3

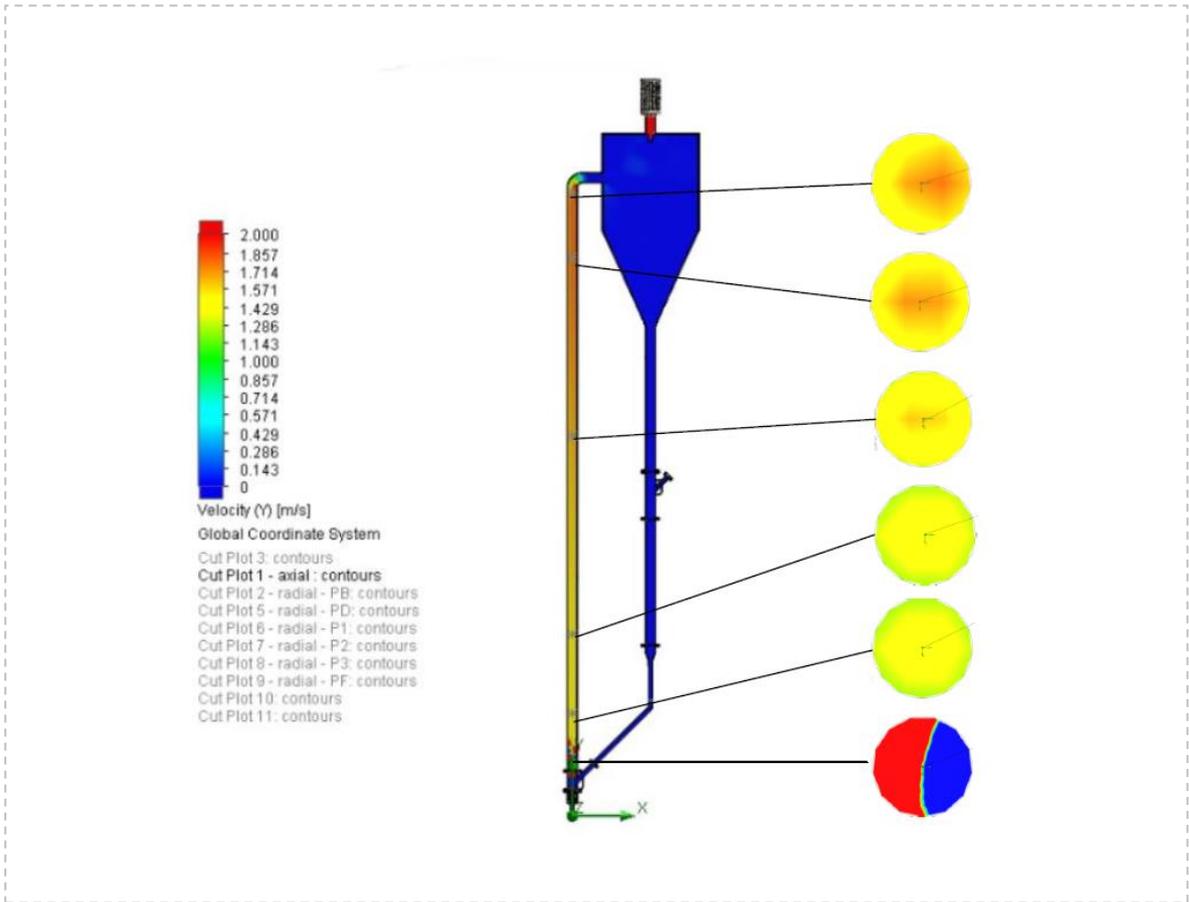


Figura 4

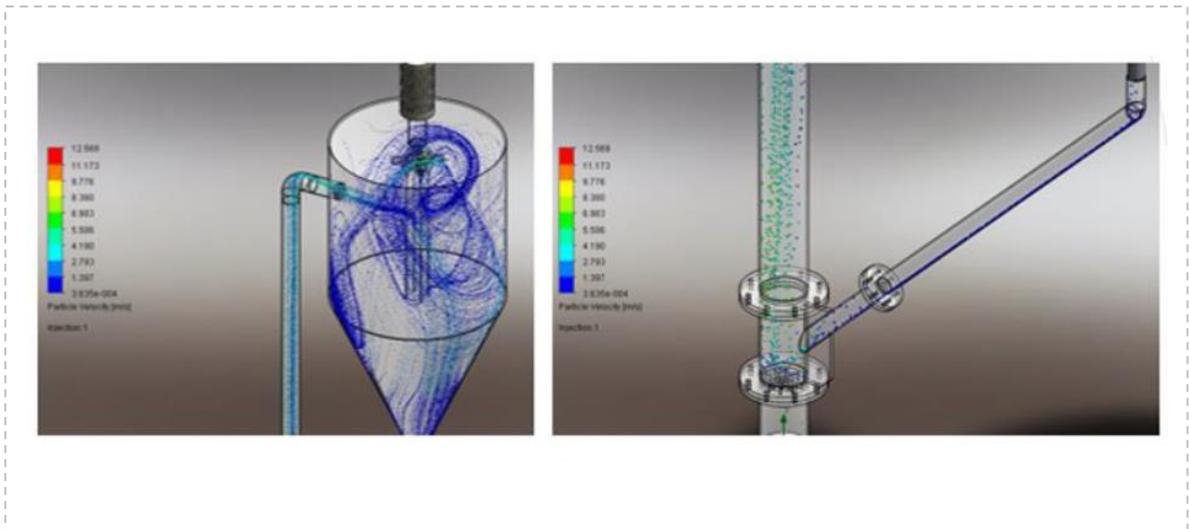


Figura 5

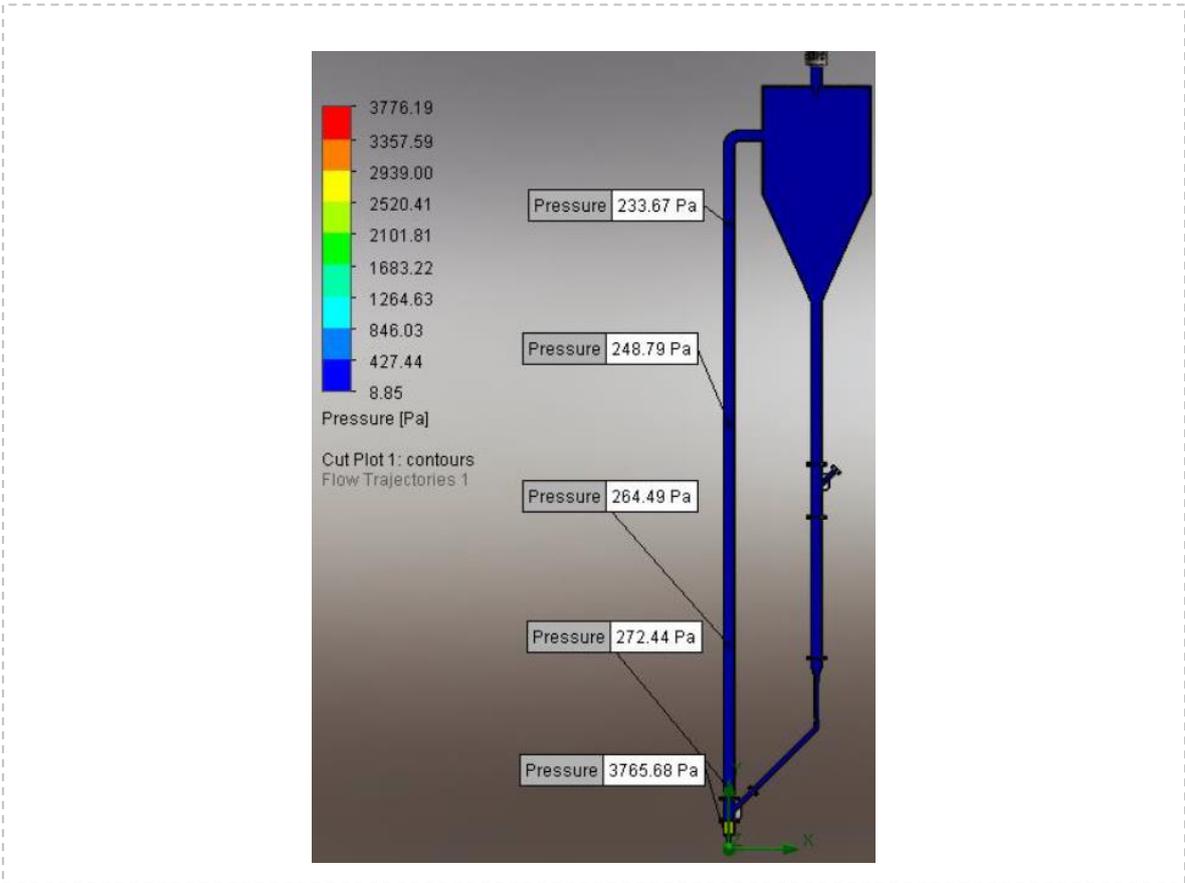


Figura 6

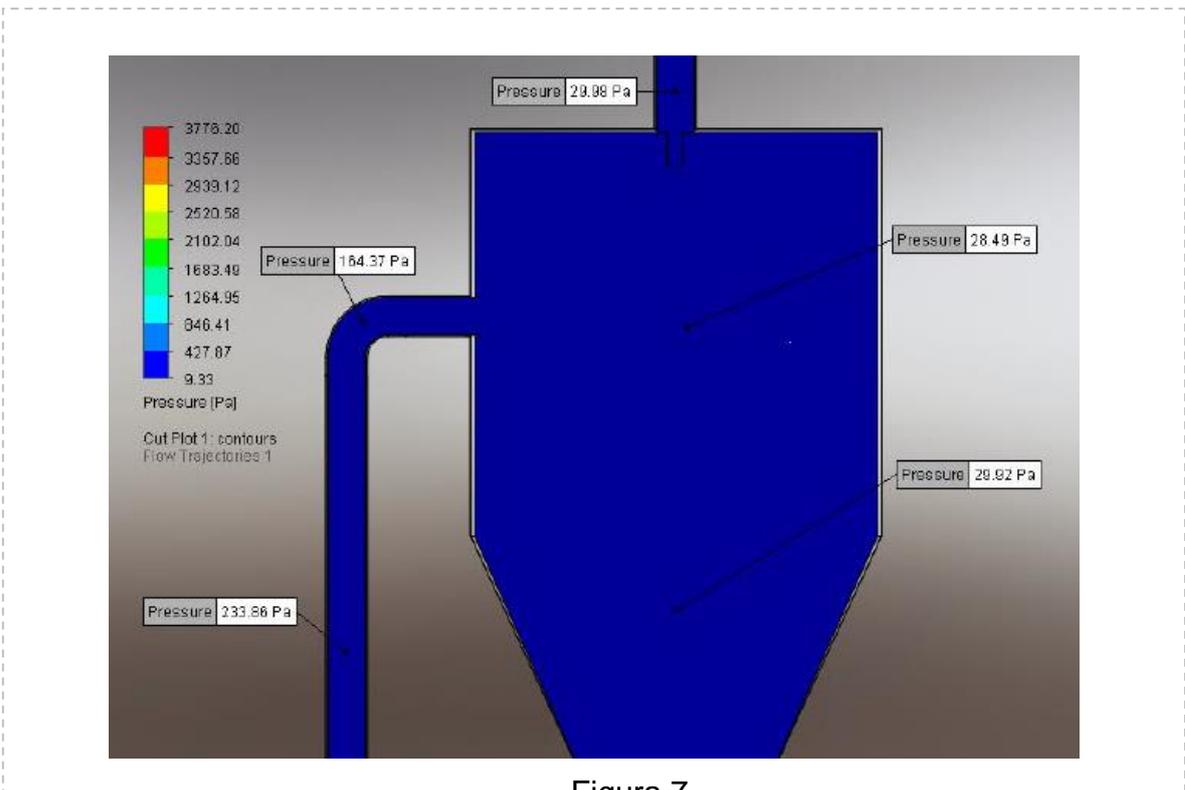


Figura 7

ATUAL ALTURAS (m)	PRESSÃO (Pa)	
	UPF FÍSICA	UPF VIRTUAL
0,245	3776,4	3765,6
0,804	291,1	272,4
2,137	273,6	264,4
4,192	258,6	248,7
6,044	234,2	233,6

Figura 8

PRESSÃO AO LONGO  
DO RISER.

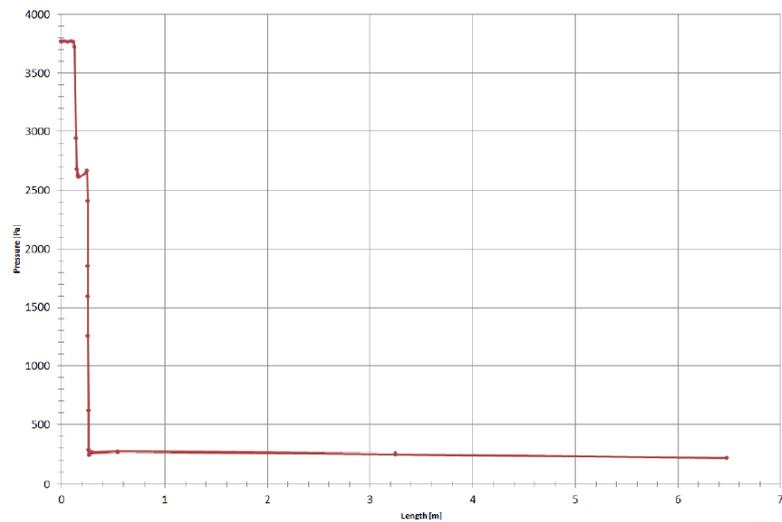


Figura 9

# CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS

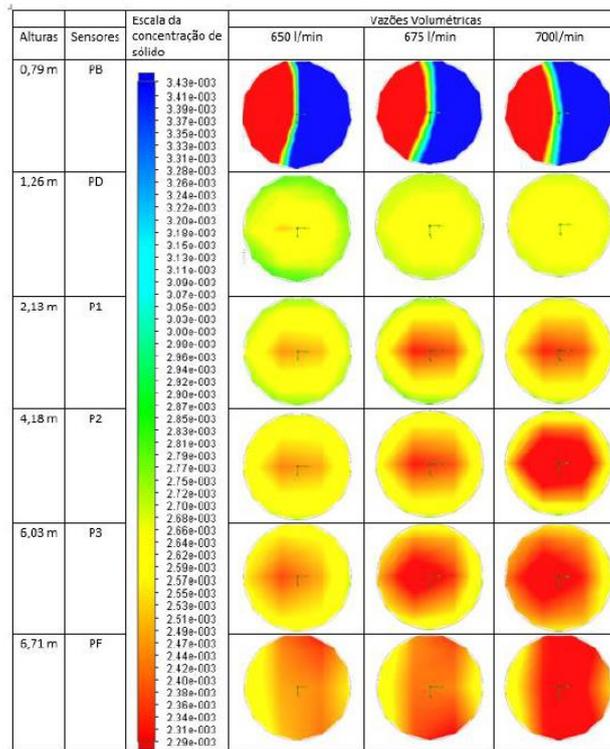


Figura 10

## CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS

CALCULADA					
Volume de Controle	Alturas	Sensores	650 L/Min	675 L/Min	700 L/Min
V1	1,26 m	PD	0,00295 Kg/m <sup>3</sup>	0,00265 Kg/m <sup>3</sup>	0,00221 Kg/m <sup>3</sup>
V2	2,13 m	P1	0,00239 Kg/m <sup>3</sup>	0,00222 Kg/m <sup>3</sup>	0,00213 Kg/m <sup>3</sup>
V3	4,18 m	P2	0,00212 Kg/m <sup>3</sup>	0,00201 Kg/m <sup>3</sup>	0,00195 Kg/m <sup>3</sup>
V4	6,03 m	P3	0,00196 Kg/m <sup>3</sup>	0,00182 Kg/m <sup>3</sup>	0,00175 Kg/m <sup>3</sup>
V5	6,71 m	PF	0,00147 Kg/m <sup>3</sup>	0,00141 Kg/m <sup>3</sup>	0,00136 Kg/m <sup>3</sup>

SIMULAÇÃO					
Volume de Controle	Alturas	Sensores	650 L/Min	675 L/Min	700 L/Min
V1	1,26 m	PD	0,00262 Kg/m <sup>3</sup>	0,00251 Kg/m <sup>3</sup>	0,00244 Kg/m <sup>3</sup>
V2	2,13 m	P1	0,00255 Kg/m <sup>3</sup>	0,00243 Kg/m <sup>3</sup>	0,00237 Kg/m <sup>3</sup>
V3	4,18 m	P2	0,00247 Kg/m <sup>3</sup>	0,00234 Kg/m <sup>3</sup>	0,00229 Kg/m <sup>3</sup>
V4	6,03 m	P3	0,00226 Kg/m <sup>3</sup>	0,00222 Kg/m <sup>3</sup>	0,00218 Kg/m <sup>3</sup>
V5	6,71 m	PF	0,00204 Kg/m <sup>3</sup>	0,00213 Kg/m <sup>3</sup>	0,00201 Kg/m <sup>3</sup>

Figura 11

TAXA DE CIRCULAÇÃO: Cs x Vs

VELOCIDADE DE SÓLIDOS SIMULADA			CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS SIMULADA		
1,26 m	PD	0,938 m/s	1,26 m	PD	0,00262 Kg/m <sup>3</sup>
2,13 m	P1	1,484 m/s	2,13 m	P1	0,00255 Kg/m <sup>3</sup>
4,18 m	P2	1,494 m/s	4,18 m	P2	0,00247 Kg/m <sup>3</sup>
6,03 m	P3	1,602 m/s	6,03 m	P3	0,00226 Kg/m <sup>3</sup>
6,71 m	PF	1,733 m/s	6,71 m	PF	0,00204 Kg/m <sup>3</sup>

CÁLCULO TAXA DE CIRCULAÇÃO DE SÓLIDOS - SIMULAÇÃO			
1,26 m	PD	0,0024 Kg/m <sup>2</sup> s	REGIME DENSO
2,13 m	P1	0,0038 Kg/m <sup>2</sup> s	REGIME DENSO
4,18 m	P2	0,0037 Kg/m <sup>2</sup> s	TRANSIÇÃO
6,03 m	P3	0,0036 Kg/m <sup>2</sup> s	REGIME DILUÍDO
6,71 m	PF	0,0035 Kg/m <sup>2</sup> s	REGIME DILUÍDO

Figura 12

CÁLCULO TAXA DE CIRCULAÇÃO DE SÓLIDOS - COMPARAÇÃO				
		CALCULADA	SIMULADA	
1,26 m	PD	0,0039 Kg/m <sup>2</sup> s	0,0024 Kg/m <sup>2</sup> s	REGIME DENSO
2,13 m	P1	0,0036 Kg/m <sup>2</sup> s	0,0038 Kg/m <sup>2</sup> s	REGIME DENSO
4,18 m	P2	0,0034 Kg/m <sup>2</sup> s	0,0037 Kg/m <sup>2</sup> s	TRANSIÇÃO
6,03 m	P3	0,0033 Kg/m <sup>2</sup> s	0,0036 Kg/m <sup>2</sup> s	REGIME DILUÍDO
6,71	PF	0,0025 Kg/m <sup>2</sup> s	0,0035 Kg/m <sup>2</sup> s	REGIME DILUÍDO

Figura 13

**RESUMO****MODELO VIRTUAL 3D DE UNIDADE DE CRAQUEAMENTO CATALÍTICO  
FLUIDIZADO COM SIMULAÇÃO DE FLUXO DE PROCESSO DE ESCOAMENTO EM  
CICLO FECHADO**

Na indústria, a constante criação e modificação de projetos pilotos e protótipos para verificação das características físicas e operacionais do equipamento faz com que os custos de desenvolvimento e aperfeiçoamento de novos produtos seja elevado. A literatura demonstra a importância existente na realização de simulações através de recursos computacionais, seja para análise da resistência ou para o estudo da fluídodinâmica. Portanto, o presente trabalho refere-se a criação de unidade piloto virtual 3D de FCC, com as mesmas características físicas da unidade experimental presente no DEN e ainda a simulação das condições de operação iguais ao da unidade experimental. Os dados de entrada são vazão de entrada do ar, vazão de entrada de sólidos, pressão, densidade e tamanho da partícula. Com as simulações realizadas, conseguiu-se a convergência dos valores de pressão e vazão, para valores próximos aos medidos na unidade experimental nos mesmos pontos de medição através da transmissão gama. Também conseguiu-se obter valores de concentração de sólidos e velocidades de sólidos aproximados ao verificados na unidade física, validando assim as simulações computacionais. A unidade é composta por um riser, uma câmara de separação com 04 ciclones para separação de ar e catalisador e uma coluna de retorno de sólidos. No riser ocorre a mistura entre ar e catalisador. Na câmara de separação ocorre a separação de ar e catalisador, com o ar saindo pelo filtro superior e o catalisador caindo para parte inferior da câmara. Na coluna de retorno ocorre o retorno do catalisador para o fluxo fechado, permitindo assim que o ciclo seja reiniciado. Ainda na coluna de retorno existe uma válvula de controle de entrada de catalisador.