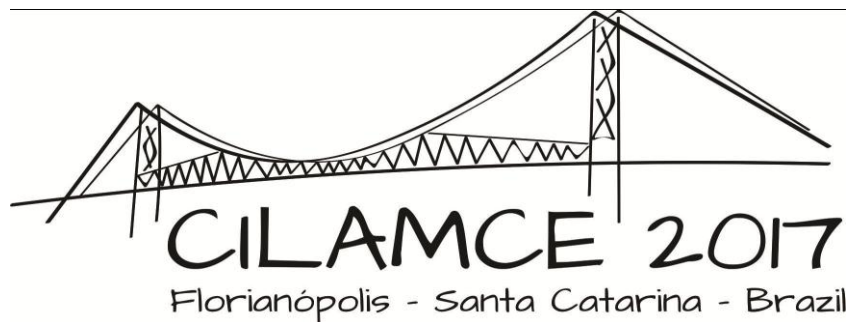




MODELO MULTIFÁSICO PARA SIMULAÇÃO DA DESNITRAÇÃO TÉRMICA DO NITRATO DE URÂNIO HEXAHIDRATADO EM REATOR DE LEITO FLUIDIZADO

Emanoel do Nascimento Ferreira Junior

José Adilson de Castro

enf-junior@hotmail.com

joseadilsoncastro@id.uff.br

Programa de Pós Graduação em Engenharia Metalúrgica - Universidade Federal Fluminense

Av. dos Trabalhadores, 420, Vila Santa Cecília, 27255125, Volta Redonda, Rio de Janeiro, Brasil

Resumo. A INB, Indústrias Nucleares do Brasil, atua no Ciclo do Combustível Nuclear desde a mineração até a fabricação do elemento combustível. Atualmente, a INB desenvolve parcialmente a tecnologia do ciclo do combustível nuclear comprando parte dos serviços como as etapas da conversão UF_6 e enriquecimento isotópico. Para nacionalizar e consolidar o ciclo completo do combustível nuclear, o conhecimento dos fenômenos detalhados do processamento é essencial. Neste contexto, a modelagem matemática é uma ferramenta eficiente para desenvolver o conhecimento e o entendimento dessas fases de processamento. O presente trabalho apresenta um modelo matemático do reator de leito fluidizado capaz de produzir UO_3 pela desnitração térmica do Nitrato de Urânio Hexahidratado (NUH). Esta etapa operacional é um passo importante que o Brasil não possui e busca implantar futuramente. O modelo baseia-se na teoria multifásica e multicomponente acoplada com o modelo turbulento $k-\epsilon$. O movimento transiente 3D das partículas e as fases gasosas são simuladas juntamente com a cinética da evolução do tamanho das partículas e fenômeno da desnitração. Os efeitos dos parâmetros operacionais como temperatura do leito, taxas de alimentação, retenção de sólidos e concentração de enxofre também foram avaliados. Os resultados são comparados com os resultados de evolução do tamanho médio coletados na literatura.

Palavras-chave: Processamento do combustível nuclear, modelamento multifásico, leito fluidizado, evolução do diâmetro médio, desnitração

1 INTRODUÇÃO

Responsável pela produção dos elementos combustíveis desde a prospecção do minério e submetida ao Programa Nuclear Brasileiro - PNB, a Indústrias Nucleares do Brasil – INB busca a consolidação e domínio em escala industrial de todas as etapas de produção do ciclo do combustível nuclear que lhe competem. Hoje em dia as etapas de conversão em UF_6 e parte do enriquecimento isotópico são realizadas no exterior. Este fato, pode levar a geração nucleoeletrônica no Brasil refém dos fornecedores destes serviços, nem sempre garantidores do atendimento das necessidades desejadas, no que diz respeito a preços, quantidades, logística e prazos. Portanto, a nacionalização de 100% destas etapas diminuiria estes custos e promoveria a independência tecnológica das atividades do ciclo de produção do combustível nuclear.

Atualmente a INB executa projetos e trabalhos de pesquisas com o intuito de possibilitar a implantação da conversão, bem como obter autonomia na etapa de enriquecimento. Neste quadro de estudos e desenvolvimento, todas as fases do processamento físico-químico inerentes à conversão estão sendo estudadas e compreendidas em sua integralidade, investigando-se todos os critérios básicos de projeto, tecnologias existentes para execução de todos os estágios de processamento, dentre outros desenvolvimentos. Neste contexto de desenvolvimento, a aplicação de modelos matemáticos que representam esses mecanismos de reação e fenômenos físico-químicos que possam auxiliar estes estudos é vantajosa. As simulações numéricas são mais baratas que ensaios ou testes em laboratórios, e quando bem desenvolvidas permitem a avaliação destas informações de processamento, tornando-se assim, uma importante ferramenta para análises e investigação de variações nos parâmetros operacionais, poupando a necessidade de testes reais em operação.

Neste cenário, este trabalho apresenta um modelo matemático bifásico (sólido e gás), transiente e tridimensional, capaz de avaliar a produção de trióxido de urânio (UO_3) via reator de leito fluidizado através da desnitração térmica do nitrato de uranila hexahidratado – NUH. A desnitração é uma das importantes fases de processamento químico que integra a etapa de conversão do ciclo do combustível nuclear, etapa esta não executada nacionalmente.

No desenvolvimento do modelo utilizou-se o método de volumes finitos para a discretização das equações de balanço de massa, quantidade de movimento e energia. As equações para representação do fenômeno de turbulência segundo o modelo $k-\varepsilon$ e leis de parede para solução dos campos de velocidade e temperatura próximas à parede foram contempladas. Os efeitos dos parâmetros operacionais como temperatura do leito, taxas de alimentação, retenção de sólidos e concentração de enxofre foram avaliados. Dados reais de diâmetro médio de partículas de UO_3 produzidas via leito fluidizado foram utilizados para prover o modelo e avaliar os resultados obtidos em simulação (Fane *et al.*, 1974; Gonzalez & Otero, 1973; Lainetti, 1991; Santos & Costa, 1990).

2 METODOLOGIA

2.1 Ciclo do Combustível Nuclear e Etapa de Conversão em UF_6

O ciclo do combustível nuclear (CCN) compreende desde a fase de mineração do urânio até a produção de energia elétrica propriamente dita. O ciclo do combustível possui 7 etapas principais:

1. Mineração e produção do concentrado de urânio;
2. Conversão de U_3O_8 em UF_6 ;
3. Enriquecimento isotópico;
4. Conversão do UF_6 em pó de UO_2 ;
5. Produção de pastilhas de UO_2 ;
6. Fabricação dos elementos combustíveis;
7. Geração de energia;

As seis primeiras etapas são de responsabilidade da INB. Conforme já elucidado, a conversão em UF_6 e parte do enriquecimento Isotópico são realizadas externamente e vem sendo realizados estudos e pesquisas para que se obtenha a autonomia em todas estas etapas.

A etapa de conversão especificamente tem papel fundamental no ciclo do combustível nuclear, pois é a responsável por transformar através de processamento químico o *yellowcake* (concentrado de urânio) em gás UF_6 nuclearmente puro. Trata-se da etapa do ciclo do combustível preparatória para o enriquecimento do urânio natural (INB, 2014).

Os processos químicos envolvidos na tecnologia da conversão no Brasil estão em fase de desenvolvimento laboratorial e em escala piloto (Dias *et al.*, 2011). A Fig. 1 apresenta sinteticamente as etapas de processamento químico que compõem a fase de conversão.

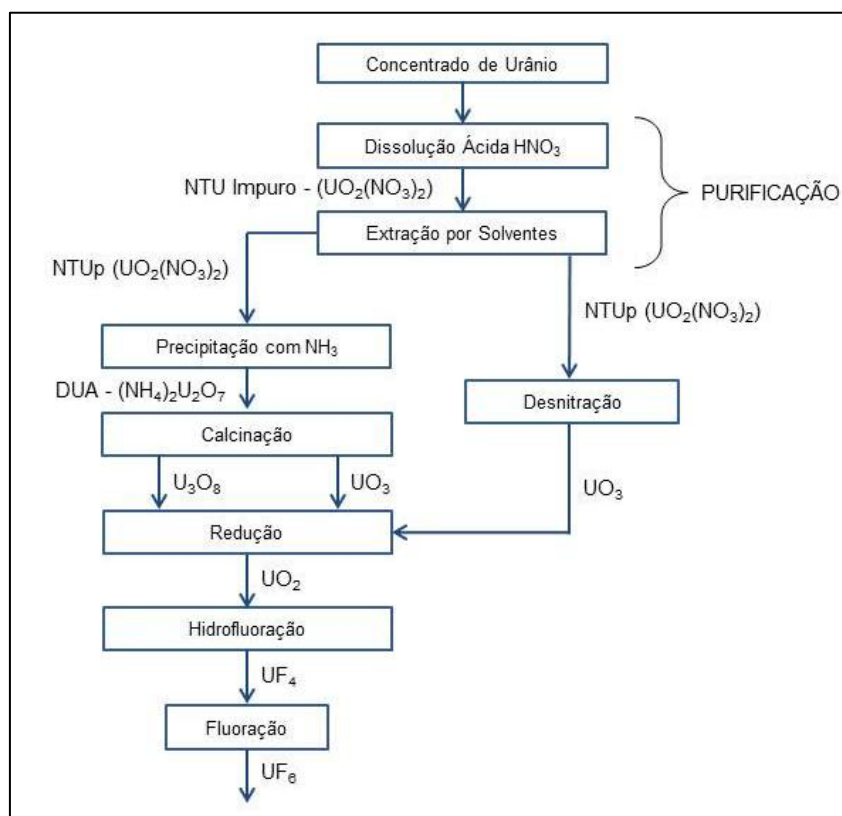


Figura 1: Fluxograma da produção de UF_6 a partir do concentrado de urânio – Conversão.

2.2 Processo de Desnitração

Como observado na Fig. 1, a etapa de conversão é um conjunto de vários processamentos químicos que vai desde o concentrado de urânio até a produção do UF_6 . Após o beneficiamento do minério, o concentrado de urânio sofre uma dissolução com ácido nítrico e

posterior purificação para obtenção de uma solução de nitrato de uranila altamente purificado (NTUp). Este NTUp permite a produção do UO_3 , sendo esta etapa substancial para a produção do UF_6 . Duas rotas tecnológicas se destacam para a obtenção do UO_3 pelo NTUp (Wildhagen, 1993):

1. Precipitação e Calcinação (rota tradicional): o urânio contido na solução de NTUp é precipitado pela ação da amônia na forma de diuranato de amônia (DUA). Esse precipitado é calcinado gerando UO_3 ;
2. Desnitração Térmica: a solução de NTUp é concentrada por evaporação dando origem ao nitrato de uranila hexahidratado (NUH) que é então aquecido, obtendo-se a desidratação complementar e a decomposição térmica à UO_3 (Lainetti, 1991; Santos & Costa, 1990).

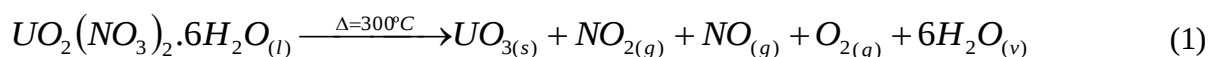
A desnitração térmica do NUH surge em substituição à rota tradicional de precipitação e calcinação do DUA. Esta técnica destaca-se pela simplicidade e é atrativa pelos pontos de vista ambiental e econômico quando comparada à rota tradicional. A desnitração cessa a utilização da amônia; composto de elevada periculosidade que demanda infraestrutura significativa para tratamento de efluentes; bem como recupera o ácido nítrico proveniente da decomposição do nitrato (Santos & Costa, 1990).

O processo de desnitração em temperatura controlada envolve duas etapas principais (Harrington & Ruehle, 1959):

1. Concentração da solução de NTUp por evaporação até a composição aproximada do $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$;
2. Desidratação adicional e desnitração do $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$ até atingir o UO_3 (desnitração global)

A desnitração do NUH requer energia na forma de calor, a qual é obtida em uma faixa de temperatura na ordem de 200-350 °C. Como produto da desnitração tem-se o trióxido de urânio UO_3 e a geração de oxigênio, vapor d'água e gases nitrosos (NO_x). Na prática, os gases gerados durante o processo são canalizados para um sistema de lavagem de gases e recuperação de ácido nítrico oriundo dos vapores nitrosos (Fane *et al.*, 1974; Santos & Costa, 1990).

A reação química global da desnitração do NUH está representada abaixo:



Os tipos de equipamentos e as condições operacionais de desnitração tais como temperatura, mecanismos de transferência de calor, vazão e concentração de alimentação, influenciam as principais propriedades físico-químicas do UO_3 produzido (Fane *et al.*, 1974; Gonzalez & Otero, 1973; Haas *et al.*, 1981; Lainetti, 1991). Características como tamanho médio da partícula, área superficial e reatividade, são importantes para o rendimento do UO_3 nas etapas seguintes de redução à UO_2 e hidrofluoração para produção de UF_4 . No entanto, propriedades físico-químicas características da partícula como reatividade e área superficial são importantes de serem avaliadas, mas que dentro de um desenvolvimento macro, torna-se inaplicável em um primeiro momento. Portanto, a avaliação da área superficial da partícula com respectivo aumento da reatividade não foi realizada neste trabalho.

2.3 Desnitração via reator de Leito Fluidizado

Inicialmente destaca-se que o processo de fluidização permite elevados coeficientes de transferência de calor e massa; boa mistura dos sólidos e a área superficial das partículas sólidas fica completamente disponível para a transferência. Estes fatores o tornam um excelente equipamento para realização de decomposição térmica e/ou aquecimento homogêneo em um leito com partículas em fluidização. A Fig. 2 apresenta um desenho esquemático do reator de leito fluidizado usado como modelo de referência para simulação da desnitração térmica do nitrato de uranila hexahidratado (Fane *et al.*,1974).

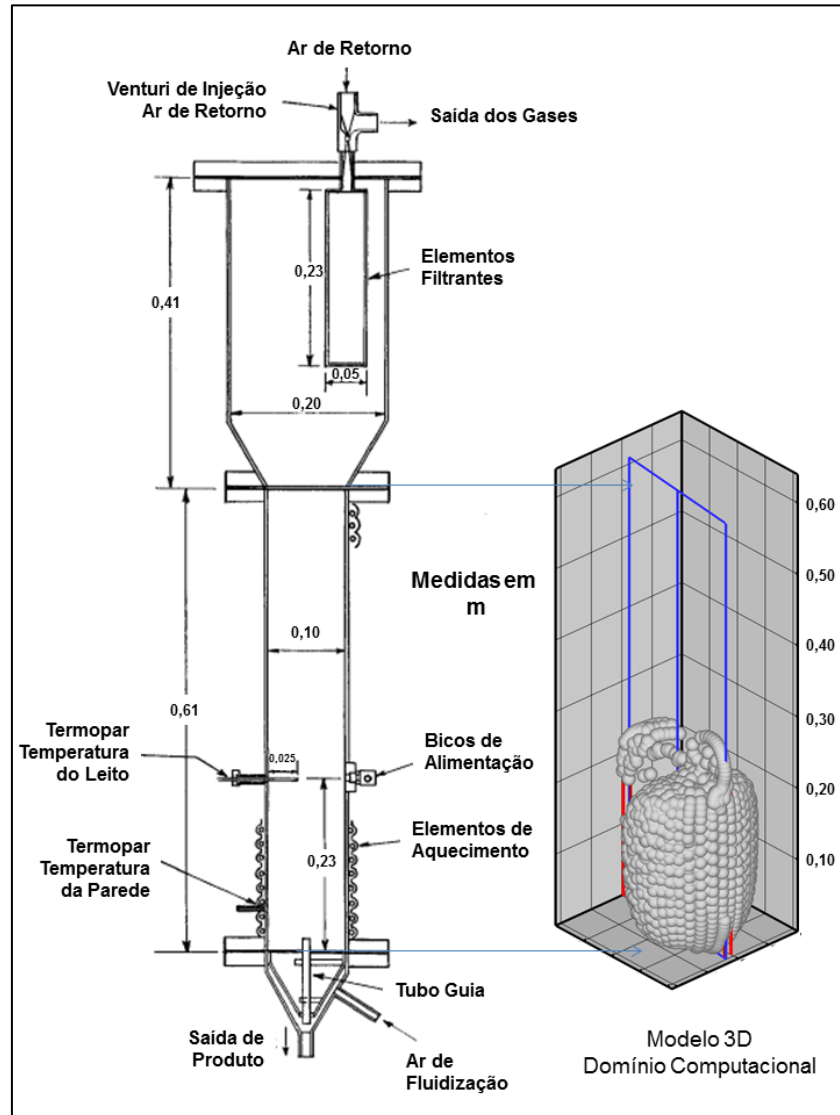


Figura 2. Reator de Leito fluidizado utilizado para Desnitração Térmica do NUH

Fonte: Fane *et al.*(1974) – Adaptado

No processo de desnitração térmica do nitrato de uranila hexahidratado em leito fluidizado, a solução de NUH é pulverizada (também se usa o termo atomizada) através do bico pulverizador (ou bico de alimentação) para dentro do reator. Comumente vertical com formato cilíndrico e de base cônica. O reator é aquecido por resistências que fornecem o

aquecimento necessário para atingir a temperatura desejada no interior. Adota-se o carregamento de uma carga inicial de partículas de UO_3 no interior do reator que funcionam como partículas nucleantes para formação de partículas maiores de UO_3 .

Após pulverização a solução é adsorvida pela superfície das partículas em fluidização, paralelamente o leito é aquecido com o fluxo de ar em alta temperatura no interior do forno, que promove a evaporação do solvente (no caso, água) assim como a decomposição térmica do NUH em UO_3 . O pó seco cai em direção ao leito que é agitado pelo fluido (ar) aquecido. Passa através da placa porosa que além de agitar o pó ali contido, evita a aglomeração e fornece energia devido a sua temperatura elevada, o que auxilia a desnitração, prevenindo para que seja completa.

Os gases e vapores acabam arrastando partículas sólidas em suas correntes, por isso, torna-se necessário um sistema de retenção/recuperação destas partículas, podendo ser utilizado um ciclone e filtros para este fim. O ácido nítrico pode ser recuperado através da condensação dos vapores ou borbulhando-se a corrente gasosa efluente em água ou solução do próprio ácido nítrico.

Fatores operacionais como temperatura, pressão, vazão e/ou taxa de alimentação, a concentração de NUH na alimentação, massa retida, bico de pulverização e a concentração de enxofre na alimentação, possuem influência nas características do UO_3 produzido por este processo. A elevação da temperatura aumenta o tamanho e a densidade da partícula. Aumentando-se a concentração de NUH na alimentação diminui-se o tamanho de partícula e aumenta-se a área superficial enquanto que o aumento da pressão e da vazão de alimentação influenciam no tamanho de partícula e na área superficial (Fane *et al.*, 1974).

2.4 Modelamento Matemático

Para simular o processo de desnitração em leito fluidizado, será desenvolvido um modelo matemático bifásico (sólido-gás) tridimensional com multicomponentes. O modelo consiste na interação de duas fases, onde a espécie química de cada fase é calculada baseada na equação de conservação para cada espécie química. A modelagem matemática segue a hipótese de meio contínuo e, como tal pode ser expresso por equações de balanço de massa, quantidade de movimento e energia.

As equações utilizadas no modelo representam os princípios de conservação de quantidade de movimento (*momentum*), energia e massa, também conhecida como equação da continuidade. Em um escoamento multifásico, como os componentes encontram-se misturados, pode-se caracterizar a presença de cada componente por sua fração molar ou por sua fração mássica. As equações são resolvidas em um complexo código computacional feito em linguagem Fortran 90/95. O modelamento utilizado para foi desenvolvido com base no código de Castro (2000). Este código foi utilizado por se tratar de uma ferramenta já testada e conhecida. No entanto sofreu alterações e complementações para contemplar a fenomenologia característica do leito fluidizado. A metodologia de cálculo, todavia, não sofreu alteração.

As mudanças realizadas dizem respeito às equações que representam a turbulência e as equações de fechamento para velocidade e temperatura na camada limite turbulenta próxima a parede do leito (Hodapp, 2012; Bird, 2004). O modelo utilizado para representar o reator é transiente, o que possibilita a análise em determinado tempo do que está ocorrendo no instante “t” analisado.

As equações de *momentum*, energia, massa e espécies químicas, contempladas no modelo, são apresentadas a seguir:

Equação de *Momentum*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i u_j) + \text{div}(\alpha_i \rho_i \vec{U}_i u_j) = \text{div}(\alpha_i \mu_{eff} \text{grad}(u_j)) - \text{grad}(P_i) + F_i^j \quad (2)$$

Equação de *Energia*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i E_i) + \text{div}(\alpha_i \rho_i \vec{U}_i E_i) = \text{div}\left(\frac{\lambda_{eff}}{C_{p,i}} \text{grad}(E_i)\right) + \sum_{i=1}^{n \text{ reagentes}} R_i \Delta h_i + E_i^j \quad (3)$$

Equação da *Continuidade*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i) + \text{div}(\alpha_i \rho_i \vec{U}_i) = \sum_{i=1}^{n \text{ reagentes}} R_i \quad (4)$$

Equação das *Espécies Químicas*

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \phi_{i,k}) + \text{div}(\alpha_i \rho_i \vec{U}_i \phi_{i,k}) = \text{div}\left(\alpha_i \frac{D_k^i}{\alpha_i \rho_i} \text{grad}(\phi_{i,k})\right) + \sum_{i=1}^{n \text{ reagentes}} R_i \beta_k \quad (5)$$

Onde:

$$\mu_{eff} = \mu_i + \mu_T \quad (6)$$

$$\lambda_{eff} = \lambda_i + \lambda_T \quad (8)$$

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

$$\lambda_T = \varphi_T \rho C_p \quad \text{ou} \quad \lambda_T = \frac{\mu_T C_p}{Pr_T} \quad (9) \text{ e } (10)$$

Descrição das variáveis e parâmetros

Variável / Definição		Variável / Definição	
i e j	fases a serem consideradas:	E_i	a energia específica [J]
ρ_i	densidade da fase i [kg/m ³]	$C_{p,i}$	o calor específico da fase i [J/mol.K]
α_i	fração volumétrica da fase i	Δh_i	a variação da entalpia [J]
u_j	os componentes da velocidade	E_i^j	a energia da fase i [J]
$\vec{U}_i$	o vetor velocidade da fase i	R_i	as massas geradas devido à reações químicas [kg]
P_i	a pressão da fase i [Pa]	$\phi_{i,k}$	a fração mássica da espécie k fase i
F_i^j	a interação de <i>momentum</i> entre as fases i e j	D_k^i	o coeficiente de difusão da espécie k na fase i [m ² /s]
F_i^i	a interação de <i>momentum</i> na fase i	β_k	os parâmetros cinéticos da fase
μ_{eff}	a viscosidade efetiva da fase i [kg/m.s]	Pr_T	número de Prandtl turbulento
μ_i	viscosidade dinâmica da fase i [kg/m.s]	λ_{eff}	a condutividade térmica efetiva [W/m.K]
μ_T	viscosidade turbulenta [kg/m.s]	λ_i	condutividade dinâmica da fase i [W/m.K]
φ_T	difusividade térmica turbulenta	λ_T	condutividade turbulenta [W/m.K]

2.5 Modelo de Turbulência (k - ε) e Leis de Parede

A turbulência é um fenômeno presente nos reatores de leitos fluidizados no qual as partículas do fluido se misturam de forma não linear, e é representada através de diversos modelos de turbulência. Para este trabalho em específico, foi utilizado o modelo k - ε (Epsilon) para representar esta fenomenologia. O modelo k - ε apresenta vantagens por ser um modelo simples, necessitando somente de condições iniciais e de contorno para sua aplicação. Possui um ótimo desempenho para a maioria dos escoamentos relevantes da indústria, além de ser o modelo mais validado com dados experimentais (Sant'Anna *et al.*, 2015).

No modelo de turbulência k - ε , k é a energia de turbulência e é definida como a variação das flutuações de velocidade e ε é a dissipação de energia turbulenta (a taxa na qual as flutuações de velocidade se dissipam). É considerado robusto, econômico e razoavelmente preciso para uma larga faixa de escoamentos turbulentos (Sant'Anna *et al.*, 2015).

Para o fechamento das equações de transporte do modelo contínuo dependentes de k e ε , estes são obtidos pela solução das equações de transporte para estas variáveis. Neste trabalho serão utilizadas as equações para k - ε modificadas com o termo adicional, que inclui a transferência de quantidade de movimento turbulenta entre as fases (Hodapp, 2012; Farias, 2010).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i k_i) + \text{div}(\alpha_i \rho_i \vec{U}_i k_i) = \text{div} \left[\alpha_i \left(\mu_i + \frac{\mu_{T,i}}{\sigma_k} \right) \text{grad}(k_i) \right] + \alpha_i (G_{k,i} - \rho_i \varepsilon_i + \rho_i \Pi_{k,i}) \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_i \rho_i \varepsilon_i) + \text{div}(\alpha_i \rho_i \vec{U}_i \varepsilon_i) = \text{div} \left[\alpha_i \left(\mu_i + \frac{\mu_{T,i}}{\sigma_\varepsilon} \right) \text{grad}(\varepsilon_i) \right] + \alpha_i \frac{\varepsilon_i}{k_i} (C_{1\varepsilon} G_{k,i} - C_{2\varepsilon} \rho_i \varepsilon_i) + \alpha_i \rho_i \Pi_{\varepsilon,i} \quad (12)$$

Definição das variáveis e parâmetros da equação do modelo k - ε

Variável / Definição		Variável / Definição	
α_i	fração volumétrica da fase i	$G_{k,i}$	produção de energia na fase i [J/s]
ρ_i	densidade da fase i [kg/m ³]	ε_i	dissipação de energia turbulenta [m ² /s ³]
k_i	energia cinética de turbulência	$\Pi_{k,i}$	influência da fase i na fase j para k
$\vec{U}_i$	o vetor velocidade da fase i	$\Pi_{\varepsilon,i}$	influência da fase i na fase j para ε
$C_{1\varepsilon}$	constante do modelo k - ε	$C_{2\varepsilon}$	constante do modelo k - ε
$\sigma_k = \sigma_\varepsilon$	número efetivo de Prandtl	C_μ	Constante do modelo k - ε

As equações dos parâmetros utilizados como as constantes para o modelo de turbulência k - ε utilizados neste trabalho estão descritas e elaboradas no trabalho de Hodapp (2012).

Para a resolução dos campos de temperatura e velocidade próximos a parede foram utilizadas as chamadas Leis de parede. Leis de parede é uma técnica muito popular para escoamentos a altos números de Reynolds, uma vez que é considerada uma ferramenta robusta, relativamente precisa, popular para escoamentos industriais e que proporciona uma economia (ou otimização) no tempo computacional (Neto & Soares, 2014; Souza *et al.*, 2011).

Para simulação, o domínio computacional compreendeu a altura útil de 0,610 m do leito, conforme apresentado na Fig. 2. Inicia-se acima da grade difusora na parte inferior até o limite operacional abaixo dos filtros de captação na parte superior. A escolha deste volume para representação computacional se deve ao fato de todo o processo de aglomeração, decomposição e desnitração ocorrerem nesta região interna do reator, assim a avaliação do processo de crescimento torna-se possível.

A divisão da malha de cálculo gerou 18816 volumes de controles para discretização e cálculos dos campos de velocidade, temperatura e pressão, buscando representar as características do reator de leito fluidizado. Este número representa uma quantidade de volumes de controles suficientes para representação com acurácia dos fenômenos e comportamentos característicos do reator em questão.

O código computacional foi escrito em linguagem Fortran 90/95 e os resultados das simulações são plotados através do software Tecplot 360, possibilitando a análise de dados visuais integrados em 1D, 2D e 3D.

2.6 Fases e Reações Químicas

As fases consideradas no modelo serão gás e sólido, as quais serão listadas, juntamente com os componentes, na Tabela 1 a seguir:

Tabela 1: Fases e espécies químicas consideradas no modelo

Fases	Espécies Químicas (i)
Gasosa (g)	NO_2 , NO , N_2 , O_2 , H_2O , HNO_3
Sólida (s)	UO_2 , UO_3 , U_3O_8 , $UO_2(NO_3)_2 \cdot 6H_2O$, $UO_2(NO_3)_2 \cdot 3H_2O$, $UO_2(NO_3)_2 \cdot 2H_2O$, $UO_2(NO_3)_2 \cdot H_2O$, $UO_2(NO_3)_2$, impurezas.

As principais reações químicas existentes para o processo de desnitração foram encontradas por análises termogravimétricas do NUH e seus hidratos, resultantes da desidratação continuada com posterior desnitração do NTU anidro. Em reatores onde a turbulência e atrito são fenômenos característicos, é quase impraticável aquecer um material até que o equilíbrio seja alcançado para que ocorra cada reação em sua respectiva fase de transição (faixa de temperatura) (Koslova *et al.*, 2007). O que determinará se uma reação ocorre ou não a uma dada temperatura, serão os valores das variáveis termodinâmicas calculadas a partir das entalpias padrões de formação (H_f^{298}) para cada reação.

A desnitração em temperaturas elevadas pode provocar a formação de U_3O_8 , já que este é o composto mais estável à temperatura acima de 590 °C com a decomposição do UO_3 começando em torno dos 450°C (Ribas, 1973). Este fenômeno foi desconsiderado visto que as temperaturas simuladas foram inferiores às necessárias para que ocorresse a reação. A Eq. (1) representa o mecanismo global de reação, sendo a reação considerada no modelo.

2.7 Mecanismos de Crescimento das Partículas

Foi considerado o modelo topoquímico para representar os mecanismos de decomposição térmica da partícula de UO_3 revestidas com NUH. Considera-se que a redução acontece a

partir das superfícies das partículas para o centro, mantendo sua geometria inicial, ou seja, os gradientes de decomposição são os mesmos em toda a área superficial da partícula. As principais etapas de reação e mecanismos físico-químicos propostos para a decomposição térmica do NUH no interior do leito fluidizado seriam:

1. Adsorção de uma camada de NUH às partículas de UO_3 pré-adicionadas;
2. Concentração da camada superficial de NUH por evaporação das moléculas de água em solução não ligadas ao nitrato;
3. Desidratação adicional da camada de NUH gerando vapor d'água e formando nitrato de uranila anidro;
4. Decomposição térmica do NTUa com geração de gases;
5. Dessorção do produto gasoso da superfície do óxido;
6. Formação da partícula final de UO_3 .

Na Fig. 3 é apresentado um esquemático resumido das etapas físico-químicas considerados na simulação da desnitração térmica em leito fluidizado com carregamento inicial de partículas de UO_3 .

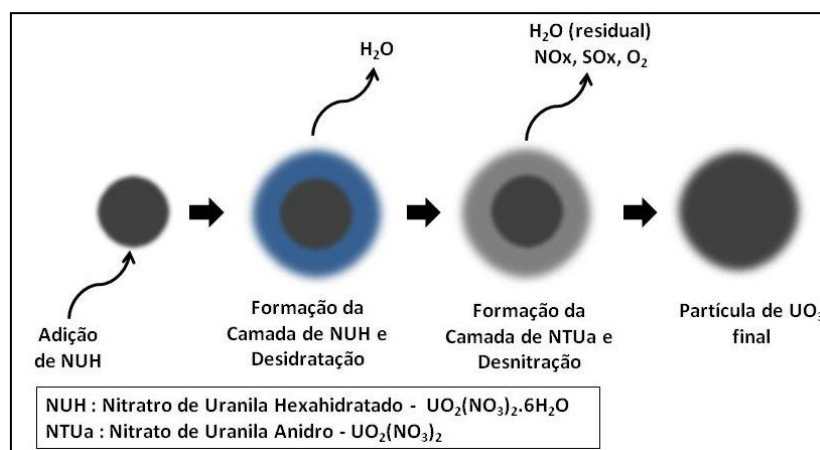


Figura 3: Esquema proposto representando as principais etapas no processo de desnitração em leito fluidizado com partículas de UO_3 como nucleantes.

Gonzalez e Otero (1973) realizaram diversas corridas em leito fluidizado avaliando a influência de parâmetros operacionais no diâmetro médio (D_{ave}) final da partícula de UO_3 obtidas pela desnitração do NUH. Para os autores, o processo de evolução do tamanho de partícula pode ser imaginado em função de dois mecanismos distintos; crescimento e atrito. Propõem-se ainda que ocorram da seguinte maneira: as partículas aquecidas de UO_3 presentes no leito fluidizado são revestidas pela alimentação que é decomposta quase instantaneamente. Mas, se a partícula revestida golpeia outra partícula quando o NUH ainda não está completamente decomposto, atrito ou rupturas superficiais irão ocorrer. Estas rupturas causarão uma redução do tamanho das partículas e geração de finos os quais podem atuar como sementes para o crescimento de novas partículas.

No estudo desenvolvido por Gonzalez e Otero, parâmetros como temperatura, concentração inicial, concentração de enxofre (íon SO_4^{2-}), taxa de alimentação, velocidade de fluidização, dentre outros, foram avaliados. Encontrou-se a concentração de enxofre na alimentação, a temperatura do reator, a taxa de alimentação e a retenção de sólidos, como parâmetros influentes no diâmetro médio final da partícula. Propôs-se então uma equação para cálculo da taxa de crescimento do diâmetro médio da partícula, D_{ave} , considerando os dois

mecanismos, crescimento e atrito. Este último, representado através de uma constante de atrito, C_a , que relaciona os parâmetros com maior interferência para cálculo de D_{ave} .

A equação proposta por Gonzalez e Otero para cálculo da taxa de crescimento do diâmetro médio D_{ave} é dada por:

$$\left(\frac{dD_{ave}}{dt}\right) = \frac{1}{3}\left(\frac{F}{W}\right)D_{ave} - C_a \cdot D_{ave}^{2,6} \quad (13)$$

A equação proposta pelos autores para cálculo do coeficiente de atrito é:

$$C_a = (89,3 - 0,297T)(1,37 - C_s)F^{1,6} \cdot 10^{-7} \quad (14)$$

Torna-se possível, portanto, um modelamento para o crescimento das partículas utilizando as equações apresentadas pelos autores. Isto porque, as etapas de adição de solução como adsorção são contempladas na Eq. (13), representadas pelas variáveis F e W . No entanto, ao avaliar os resultados preliminares obtidos para coeficiente de atrito, C_a , percebeu-se a necessidade de um ajuste na formulação proposta para cálculo do C_a . O mesmo foi ajustado e assim, obtiveram-se resultados satisfatórios para os valores de D_{ave} calculados segundo a formulação proposta por Gonzalez e Otero com o C_{am} modificado.

Considerou-se portanto para o cálculo da taxa de crescimento das partículas de UO_3 , a equação da taxa de crescimento conforme Eq. (13) e a equação do coeficiente de atrito modificado (C_{am}), conforme abaixo:

$$C_{am} = ((89,3 - 0,297T)(1,37 - C_s)F^{1,6} \cdot 10^{-7}) * 0,8 \quad (15)$$

Definições das variáveis das Equações de Gonzales e Otero (1973) e C_{am}

Variável / Definição		Variável / Definição	
T	temperatura de desnitração em °C	F	taxa de alimentação [kg/h]
C_s	concentração de sulfato [ppm]	W	massa total de UO_3 retida no leito [kg]
C_a	Constante de atrito [$\mu m^{-1,6} / h$]	C_{am}	Constante de atrito modificado [$\mu m^{-1,6} / h$]

2.8 Casos Simulados

Foram propostos nove casos operacionais do reator de leito fluidizado para simulação. Os dois primeiros foram simulados como casos bases 1 e 2. Serviram para avaliar o comportamento do modelo em função de alguns parâmetros operacionais. Não funcionaram como base para os outros casos para comparação de resultados, somente para avaliação e reelaboração de ajustes necessário. Os outros sete casos simulou-se a operação baseada nas variações dos seguintes parâmetros operacionais: temperatura, taxa de alimentação, retenção de sólidos e concentração de enxofre. Os cenários propostos para simulação consideraram em alguns casos os valores apresentados no trabalho de Gonzalez e Otero (1973) como também foram realizadas alterações de algumas variáveis objetivando a avaliação de resposta do modelo para as situações propostas. As alterações dos parâmetros foram realizadas de forma

que pudessem ser avaliados sua influência na taxa de crescimento das partículas ao longo do tempo. A concentração utilizada foi de 100% de solução de NUH para todos os casos.

Através da plotagem dos valores obtidos de D_{ave} x tempo (h) e evolução dos valores do coeficiente convectivo médio (h_{ave}), pode-se fazer as considerações e avaliações acerca dos resultados de resposta do modelo. A Tabela 2 apresenta os casos simulados com seus respectivos valores de entrada.

Tabela 2: Casos simulados e parâmetros operacionais

Casos	Faixa de Aquecimento (m)	D_0 (μm)	Temperatura Aquecimento ($^{\circ}\text{C}$)	Taxa Alimentação (kg/h)	Massa retida (kg)	Razão F/W	S (ppm)
Base 1	Até 0,230	165	297	16,5	55,5	0,2973	2000
Base 2	0,610	165	165	16,5	55,5	0,2973	2000
Caso 1	0,610	165	282	16,5	57,5	0,2869	72
Caso 2	0,610	105	268	19,2	54,8	0,3503	850
Caso 3	0,610	165	268	17,5	59,2	0,2956	2500
Caso 4	0,610	165	297	25,5	59,2	0,4307	2500
Caso 5	0,610	165	297	19,8	56,9	0,3480	850
Caso 6	0,610	165	297	19,8	54,4	0,3640	850
Caso 7	0,610	165	297	25,5	54,4	0,4687	2000

3 RESULTADOS

A Fig. 4 apresenta uma visualização em 3D do comportamento das partículas e um gráfico da evolução do diâmetro médio durante o tempo de simulação analisado para o caso 1.

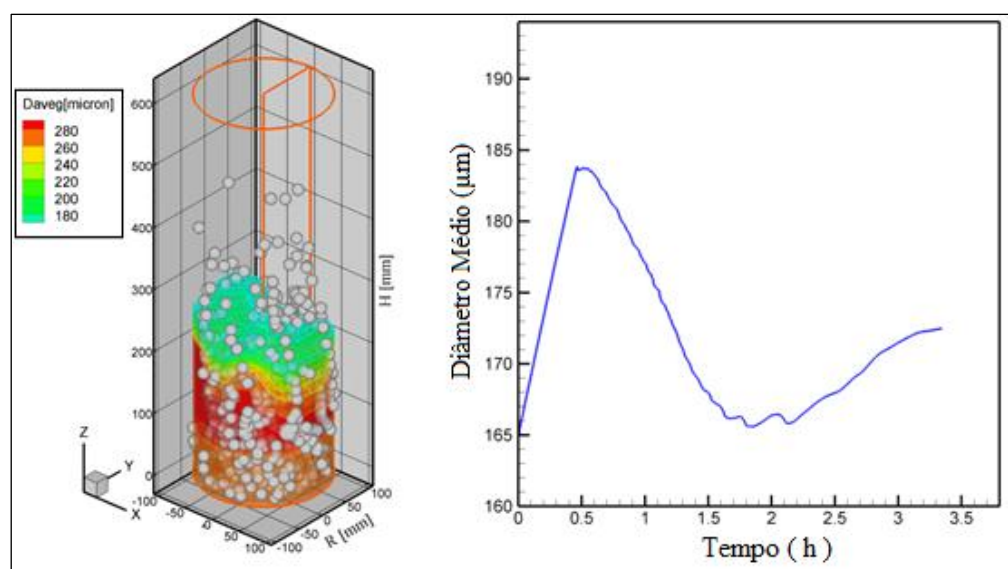


Figura 4: Distribuição de D_{ave} para o Caso Base 1 – Aquecimento até 230 mm.

O caso base 1 foi simulado com o objetivo principal de avaliar a resposta do modelo para as condições iniciais propostas e realização de ajustes. Adotou-se o aquecimento até a altura de 0,23 m, D_0 de 165 μm e uma temperatura de aquecimento de 165 $^{\circ}\text{C}$.

Adotado aquecimento somente até a altura do bico de fluidização, 230 mm, notou-se uma evolução do D_{ave} discordante com o comportamento desejado e resultados apresentados previamente na literatura. Observou-se uma taxa de crescimento elevada e linear nos primeiros 30 (trinta) minutos, com uma queda brusca dos valores de D_{ave} até duas horas de simulação. Após então retoma-se o crescimento, porém com oscilações mostrando-se instável e com pouca taxa de incremento ao D_{ave} ao longo do tempo. O comportamento apresenta então, a presença das duas parcelas dos mecanismos considerados para taxa de crescimento, Eq. (13): crescimento e atrito. Estas duas parcelas se fazem presentes durante a evolução do diâmetro médio. Primeiro tem-se a predominância do crescimento (primeiros 30 minutos) com posterior predominância do atrito, queda do D_{ave} .

Outro ponto a se analisar é o fato do aquecimento não ser realizado em todo o reator, acarretando em deltas de temperatura quando as partículas atingem a parte superior do reator. Sendo a reação de decomposição fortemente endotérmica e afetada pela temperatura, a evolução do D_{ave} pode ser creditada a esses diferenciais de temperatura no interior do leito.

O caso base 2, como o caso base 1, também foi simulado com o objetivo principal de avaliar a resposta do modelo para as condições iniciais propostas. Neste, porém, adotou-se aquecimento total da superfície externa (610 mm), mantendo-se D_0 com 165 μm e temperatura a 165 $^{\circ}\text{C}$. A Fig. 5 apresenta uma visualização em 3D do comportamento das partículas e um gráfico da evolução do D_{ave} durante o aquecimento ao longo do tempo.

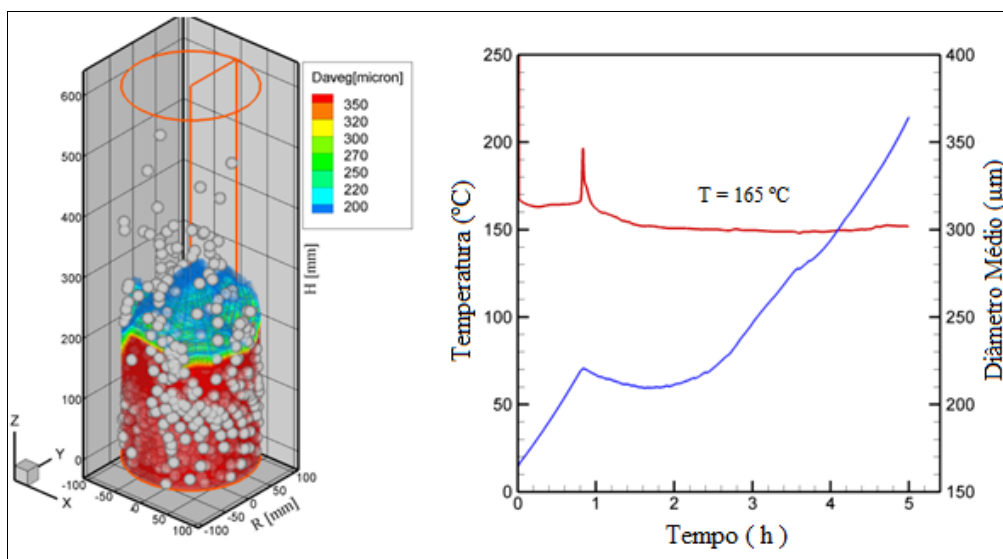


Figura 5: Distribuição de D_{ave} para o Caso Base 2 – Aquecimento em toda superfície

Neste caso, a evolução do diâmetro médio apresentou-se mais coerente com o desejado. Tem-se um crescimento inicial, uma pequena queda na taxa de crescimento (predominância do atrito) concomitantemente com um pico de temperatura próximo de uma hora de simulação. Após, retoma-se o crescimento ao longo do tempo atingindo-se um valor final de aproximadamente 365 μm .

Um fator favorável à evolução do D_{ave} aqui calculado diz respeito ao aumento gradativo ao longo do tempo. Este tipo de comportamento é o desejado para os casos com crescimento

através de adsorção na superfície das partículas e posterior decomposição térmica. Evitando-se, portanto, partículas muito grandes em pequenos períodos de tempo, o que poderia levar a produtos com características físico-químicas heterogêneas.

A área de aquecimento do reator mostrou-se um fator importante para estes dois casos simulados e ponto significativo para evolução do D_{ave} . A disponibilidade de aquecimento superficial em toda superfície permitiu uma melhor evolução no D_{ave} ao longo do tempo. Sendo assim, adotou-se aquecimento em toda superfície do reator para todos os outros casos simulados.

Para melhor visualização e análise dos resultados para os casos 1 a 7 simulados, serão apresentados em grupos de análise. Isto possibilitará também avaliar em separado a influência de determinado parâmetro modificado na evolução do D_{ave} de um caso para outro.

A seguir, Fig. 6 e 7, são plotados os gráficos de evolução do coeficiente convectivo médio (h_{ave}) e a correlação da temperatura e evolução do D_{ave} ao longo do tempo para os casos 1 e 2.

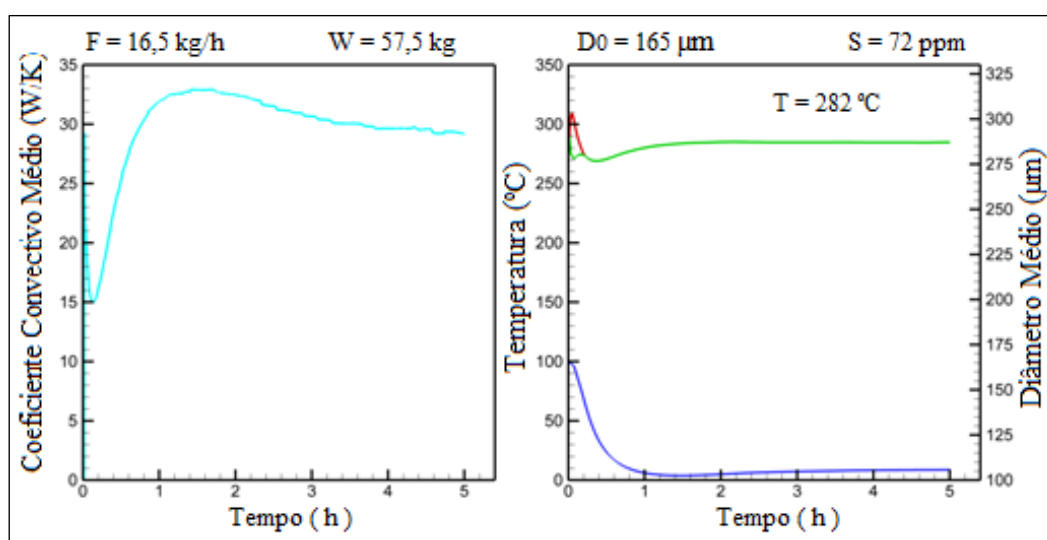


Figura 6: Resultados da Simulação do Caso 1

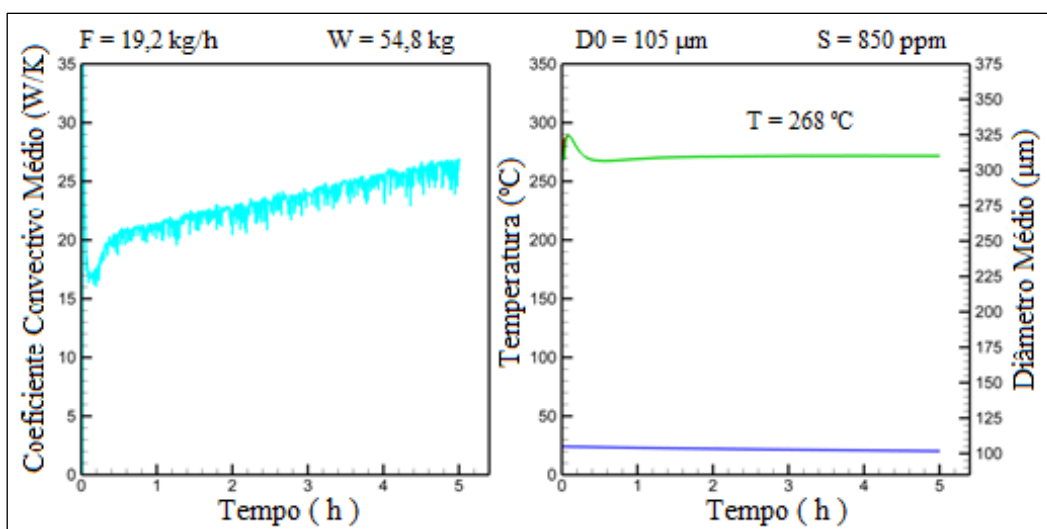


Figura 7. Resultados da Simulação do Caso 2

O D_0 adotado foi de 165 μm para o caso 1 e 105 μm para o caso 2. As temperaturas utilizadas para os casos 1 e caso 2 foram de 282 °C e 268 °C, respectivamente. A concentração de enxofre foi 72 ppm para caso 1 e 850 ppm para o caso 2. A taxa de alimentação foi de 16,5 kg/h e a retenção de 57,5 kg para o caso 1 e aumentou-se a alimentação para 19,2 kg/h diminuindo a retenção para 54,8 kg, elevando-se assim, a relação F/W do caso 1 para o caso 2, conforme apresentado na Tabela 2.

Esperavam-se valores satisfatórios para o diâmetro médio com respectivos aumentos ao longo do tempo, entretanto não foram os resultados encontrados para estes dois casos.

Para o caso 1, a temperatura de 282 °C e a taxa de alimentação possuem valores médios. No entanto, o D_{ave} decresceu até uma hora de simulação e manteve-se praticamente constante, onde seria necessário um longo período de tempo para recuperação do crescimento da partícula. Uma variável importante a ser analisada é o teor de enxofre na alimentação, 72 ppm. Este valor é considerado baixo e, portanto, influenciou no cálculo do D_{ave} através do coeficiente de atrito proposto, contribuindo para o comportamento apresentado pelo D_{ave} . Ou seja, um baixo teor de enxofre pode fazer com que a parcela do atrito predomine no cálculo do diâmetro médio levando a um decréscimo do D_{ave} no período inicial de simulação. Os resultados seguintes com maiores quantidades de enxofre adicionado apresentaram melhores comportamentos da evolução do diâmetro médio ao longo do tempo. Embora a evolução do D_{ave} não tenha sido satisfatória, o coeficiente convectivo médio apresentou evolução inversamente proporcional ao D_{ave} . Este desempenho corrobora com a correlação proposta por Fane *et al.* (1974), acrescentando um ponto positivo para a simulação realizada.

O caso 2, não apresentou evolução do D_{ave} , mantendo-se praticamente constante durante o período avaliado. Embora o comportamento não tenha sido satisfatório, deve-se ressaltar que casos práticos sem variação significativa do D_{ave} foram obtidos em trabalhos anteriores. Fane *et al.* (1974) operando a temperatura de 295 °C, com taxa de alimentação de 5,4 l/h para solução de NUH não obteve incremento do D_{ave} ao longo de aproximadamente 7 horas de operação. O enxofre elevado a 850 ppm não permitiu o crescimento, mas a manutenção do D_{ave} ao longo do tempo, visto que a temperatura foi diminuída para 268 °C, compensado também pelo aumento da relação F/W . O comportamento do h_{ave} não foi consistente para o caso 2. Embora tenha aumentado durante o decorrer do tempo de simulação o mesmo oscilou constantemente como pode ser visto no gráfico da Fig. 7.

Os casos 1 e 2 portanto, não apresentaram valores e comportamentos satisfatórios para as variáveis de entrada analisadas. Assim, para uma implementação em maior escala os mesmos não seriam utilizados sem que houvessem ajustes nos parâmetros avaliados.

As Fig. 8 e 9 apresentam os resultados dos casos 3 e 4, respectivamente. São plotados os gráficos de evolução do h_{ave} e a correlação da temperatura e evolução do D_{ave} ao longo do tempo.

No caso 3 adotou-se D_0 de 165 (μm), manteve-se a temperatura em 268 °C e elevou-se a adição de enxofre para 2500 ppm. A taxa de alimentação foi diminuída para 17,5 kg/h e a retenção de sólidos elevada para 59,2 kg. Com estes valores, dada a diminuição na vazão e aumento na retenção, esperava-se uma menor taxa de crescimento, visto que a razão F/W é menor. Esta menor taxa de crescimento esperada pode ser compensada com o aumento na adição de enxofre, elevada para 2500 ppm neste caso.

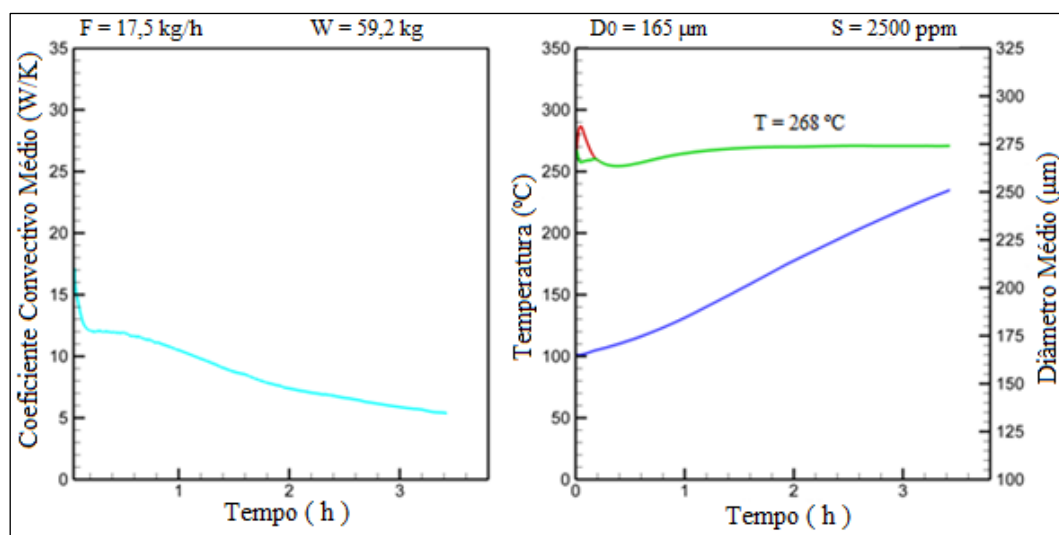


Figura 8. Resultados da Simulação do Caso 3

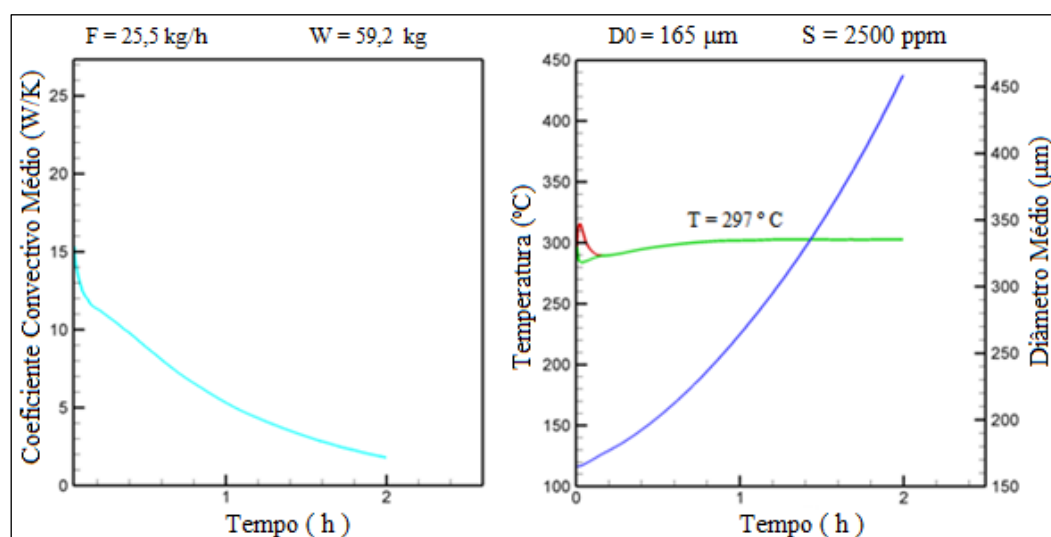


Figura 9: Resultados da Simulação do Caso 4

O resultado para o caso 3 mostrou um ganho final no D_{ave} de aproximadamente 90 μm , quando comparado ao D_0 . Este valor é considerado baixo para o tempo de simulação considerado, porém, é satisfatório para uma avaliação inicial. A temperatura não sendo muito alta e face a diminuição na relação F/W , o aumento do diâmetro médio foi compensado pela adição de enxofre conforme previsto na literatura (Morrow *et al.*, 1961). Adicionalmente, o coeficiente convectivo médio apresentou evolução inversamente proporcional ao D_{ave} durante a simulação. A taxa de decréscimo do coeficiente convectivo foi similar à taxa de incremento do diâmetro médio quando comparados os gráficos. Este desempenho concorda com a correlação prevista na literatura inicialmente o que demonstra um comportamento aceitável para o caso 3 simulado.

Para o caso 4, manteve-se D_0 de 165 μm , elevou-se a temperatura para 297°C e manteve-se o enxofre em 2500 ppm. A taxa de alimentação foi elevada para 25,5 kg/h e a retenção de sólidos mantida em 59,2 kg, aumentando significativamente a relação F/W . Com estes parâmetros de entrada, esperava-se uma elevação na taxa de crescimento da partícula, face ao

aumento da temperatura e aumento na taxa de alimentação (F). Isto foi evidenciado com uma taxa elevada de crescimento do D_{ave} em um curto período de tempo de simulação. O resultado mostrou um ganho de aproximadamente 280 μm , resultando em um D_{ave} final de aproximadamente 450 μm . A taxa de alimentação, ou seja, aumento na relação F/W , mostrou-se influente para aumento do diâmetro médio da partícula. Aumentado o valor de F tem-se ganho no D_{ave} . Vale observar também que para valores altos de enxofre, como neste caso, o ganho D_{ave} foi efetivo, condizente com os resultados apresentados na literatura (Morrow et al.; 1961). Uma maior concentração de enxofre acarreta em maiores tamanhos de partículas.

Em compensação, corroborando com os resultados da literatura, o h_{ave} dos casos 3 e 4 apresentaram evolução inversamente proporcional ao D_{ave} . Desta forma, projetando uma implementação em maior escala, estes casos propostos poderiam ser testados respeitando os valores e parâmetros inicialmente utilizados.

Nas Fig. 10 e 11 são apresentados os resultados para os casos 5 e 6.

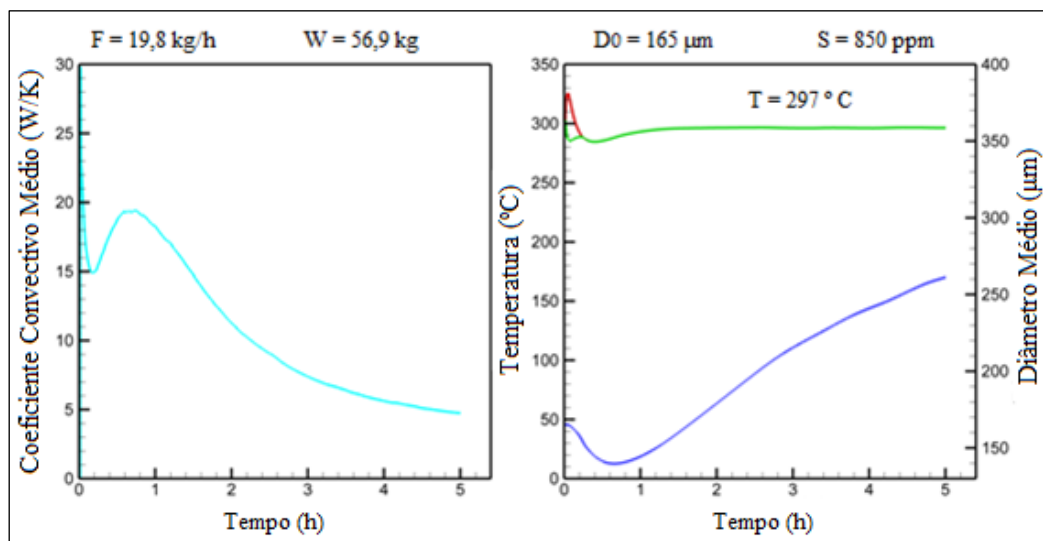


Figura 10: Resultados da Simulação do Caso 5

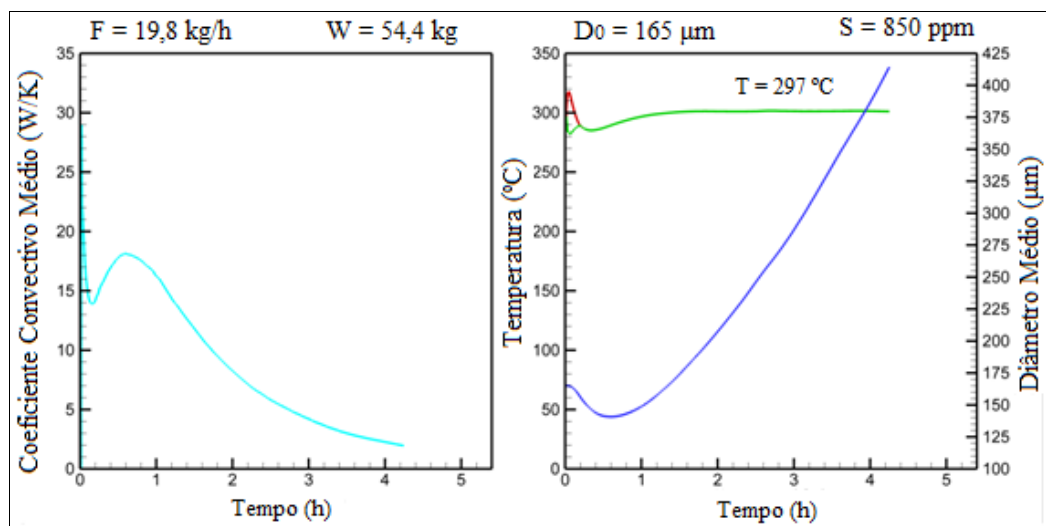


Figura 11: Resultados da Simulação do Caso 6

Avaliando os dados de entrada para os casos 5 e 6, percebe-se que a única variação realizada foi no valor de W , onde para o caso 5 é de 56,9 e caso 6, 54,4 kg. A diminuição do valor de W leva a um aumento na taxa de crescimento do D_{ave} . Isto porque a razão F/W é maior e então uma maior influência da parcela de crescimento no valor do D_{ave} , conforme Eq. (13). Este comportamento é observado quando são analisados separadamente os valores finais do diâmetro médio final para cada caso. Obtiveram-se valores de aproximadamente 400 μm para o caso 6 e 270 μm para o caso 5. Portanto, o aumento na relação F/W permite um maior incremento no D_{ave} da partícula final obtida.

A temperatura é uma variável importante a se avaliar quando analisada em conjunto com o aumento na taxa de alimentação. De acordo com Fane *et al.* (1974), o acréscimo nos valores destes dois parâmetros aumenta significativamente a taxa de crescimento do D_{ave} ao longo do tempo. Os resultados obtidos em simulação convergem aos resultados práticos obtidos.

Outro fator característico em comum foi uma curvatura para decréscimo do D_{ave} no estágio inicial de simulação. Este comportamento pode ser explicado pela menor quantidade de enxofre adicionada, 850 ppm, quando comparada aos casos 3 e 4, 2500 ppm. Menores quantidades de enxofre levam a predominância da parcela de atrito na fase inicial de para cálculo do D_{ave} . Na prática, este fenômeno poderia ocorrer devido a quebra das partículas no início da fluidização com posterior aumento contínuo do D_{ave} pela adsorção do NUH à superfície da partícula e com imediata desnitração até obtenção da partícula final de UO_3 .

Avaliando-se a evolução do h_{ave} , este apresentou comportamento exatamente inverso à evolução do D_{ave} . Inclusive, na primeira hora de simulação, quando o D_{ave} apresenta decréscimo, o h_{ave} mostra comportamento inversamente proporcional.

Buscando avaliar novamente o desempenho com aumento na taxa de alimentação, como no caso 4, foi simulado o caso 7, apresentado na Fig. 12. Neste caso, considerou-se D_0 com 165 (μm), temperatura de 297°C e 2000 ppm para enxofre. A taxa de alimentação foi elevada a 25,5 kg, aumentando a relação F/W .

O acréscimo na taxa de alimentação acarretou em um elevado aumento nos valores do D_{ave} em um período de tempo menor quando comparado ao caso 6. Este aumento no D_{ave} pela elevação da taxa de alimentação é previsto na literatura e foi obtido como resposta satisfatória do modelo.

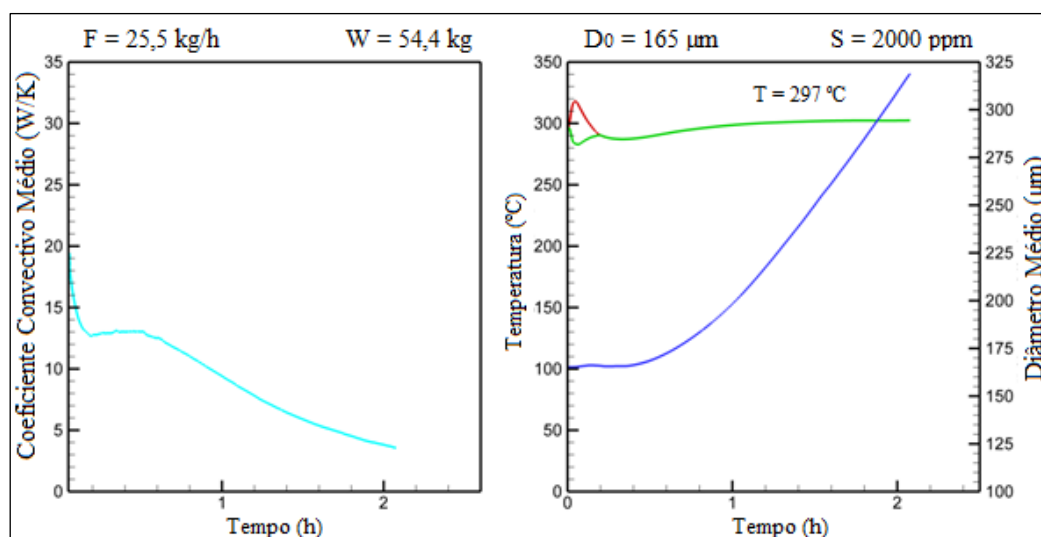


Figura 12: Resultados da Simulação do Caso 7

Em função do aumento no enxofre para 2000 ppm no caso 7, não ocorreu o decréscimo na evolução do D_{ave} nos períodos iniciais de simulação quando comparado ao caso 6. Este fato leva a conclusão e confirmação da influência dos valores de enxofre na taxa de crescimento do D_{ave} .

Contudo, conforme ocorrido nos casos 4 e 7, uma elevada taxa de crescimento da partícula em períodos curtos de tempo é operacionalmente difícil de obter e leva a uma avaliação crítica, pois na prática, esta evolução pode não ser satisfatória para obtenção das partículas com características homogêneas bem como o tempo para que ocorra a reação de desnitração pode ser prejudicado. Assim, um acréscimo elevado na taxa de alimentação objetivando um aumento no diâmetro médio deve ser avaliado criteriosamente para produção em escalas industriais.

4 CONCLUSÕES

Para o comportamento das partículas e gases no reator, os resultados para avaliação do comportamento de fluidização mostraram-se coerentes com os previstos na literatura.

Através da equação modificada para o coeficiente de atrito C_a proposto por Gonzalez e Otero (1973), foi possível prever através do modelo desenvolvido a evolução do diâmetro médio (D_{ave}) das partículas de UO_3 pela desnitração térmica do NUH via reator de leito fluidizado.

As simulações revelaram que tanto os aumentos da temperatura como a taxa de alimentação elevam a taxa de crescimento da partícula bem como o coeficiente convectivo médio é inversamente proporcional ao D_{ave} calculado. O modelo conseguiu prever estes comportamentos, no entanto, ajustes adicionais poderão ser realizados para melhor prever o crescimento das partículas considerando um limite máximo do D_{ave} dentro do reator.

Foi confirmado que a presença de enxofre causa um incremento no aumento da taxa de crescimento da partícula, porém não tanto pronunciado como ocorre com a elevação da temperatura e taxa de alimentação.

O desempenho para a maioria dos simulados mostrou a capacidade do código gerado em avaliar e prever as variações previstas na literatura para o cálculo do D_{ave} em função das variações dos parâmetros de entrada quando comparado aos resultados práticos reais.

5 REFERÊNCIAS

- Bird, R. B., Stewart, W. E., & Lightfoot, E. N. (2004). *Fenômenos de Transporte* (2ª ed.). LTC Editora - University of Wisconsin-Madison.
- CASTRO, J. A. (2000). A Multi-Dimensional Transient Mathematical Model of blast Furnace based on Multi-fluid Model. *Tese de Doutorado, Tohoku University. Japão*.
- Dias, P. E., Batochio, E., Calvelo, J. G., & Zorzetto, M. A. (2011). *Consultoria Técnica para Implantação da Nova Usina de Hexafluoreto de Urânio - INB*. São Paulo: EMGEPRON.
- Fane, A. G., Charlton, B. G., & Alfredson, P. G. (1974). *The Thermal Denitration of Uranyl Nitrate in a Fluidized Bed Reactor*. AAEC - Australian Atomic Energy Commission, Australia.

- Farias, A. S. (2010). Modelagem Numérica do Escoamento Turbulento em Superfícies Rugosas. *Dissertação de Mestrado em Ciências Mecânicas*, 108 p. Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília.
- Gonzalez, V., & Otero, A. R. (1973). Formation of UO_3 Particules in a Fluidized Bed. *Powder Technology*, 137 - 143.
- Haas, P. A., Arthur, R. D., & Stines, W. B. (1981). *Development of Thermal Denitration to Prepare Uranium Oxide and Mixed Oxides for Nuclear Fuel Fabrication*. UNION CARBIDE CORPORATION, ORNL - OAK RIDGE NATIONAL LABORATORY, Tennessee.
- Harrington, C. D., & Ruehle, A. E. (1959). *Uranium Production Technology*. Princeton, New Jersey: D. Van Nostrand, Inc.
- Hodapp, M. J. (2012). Simulação trifásica por técnicas de CFD da combustão de carvão mineral em leito fluidizado. *Tese de Doutorado*, 172 p. Unicamp - SP.
- INB. (2014). *Descritivo de Processo*. Gerência de Implantação e Processos de Conversão UF6. Resende - RJ: Indústrias Nucleares do Brasil.
- Koslova, R. D., Matyukha, V. A., & Dedov, N. V. (2007). Mechanism and Kinetics of Thermal Decomposition of Uranyl Nitrate Hexahydrate under Nonisothermal Conditions. *Radiochemistry*, Vol. 49, pp. 116-119.
- Kundu, P. K., & Cohen, I. M. (2002). *Fluid Mechanics*. Academic Press Inc.
- Lainetti, P. E. (1991). Desenvolvimento do Processo de Produção de Pós de UO_2 a partir de Nitrato de Urânio, via Atomização. *Dissertação de Mestrado*. São Paulo.
- Morrow, S. A., Graves, S., & Tomlinson, L. (1961). Hydrogen Reduction of Low-Surface Area Uranium Trioxide. *U.K.A.E.A. - United Kingdom Atomic Energy Authority*, 1400 - 1409.
- Neto, A. S., & Soares, R. F. (2014). Apostila: Turbulência dos Fluidos. *Capítulo 7: Leis de Parede*. FEMEC - Universidade Federal de Uberlândia.
- Philoon, W. C., Sanders, E. F., & Trask, W. T. (1960). The Use of a Fluidized Bed Reactor for the Continuous Production of Uranium Trioxide. *Ibid*.
- Ribas, A. G. (1973). Tecnologia de Preparação de UO_2 Adequado para Conversão a UF_4 . *Dissertação de Mestrado*, 107 p. São Paulo: Escola Politécnica da USP - SP.
- Sant'Anna, M. S., Sarmento, S. M., Silva, G. F., Medronho, R. A., & Lucena, S. (2015). Escolha do Modelo de Turbulência para um Leito Fluidizado. *Scientia Plena*, Vol. 11.
- Santos, W. R., & Costa, P. A. (1990). Obtenção de UO_3 , por desnitração do nitrato de urânio, em leito fluidizado. *3º Congresso Geral de Energia Nuclear*, pp. 109-118.
- Souza, J. A., Oliveira, L. R., Azevedo, J. L., Soares, I. D., & Mata, M. M. (2011). Uma revisão da turbulência e sua modelagem. *Revista Brasileira de Geofísica*, Vol 29, pp. 21-41.
- Wildhagen, G. R. (1993). Estudo da Decomposição Térmica do Nitrato de Urânio e Hidróxido de Cério em Secador Spray. Rio de Janeiro.