

PROJETO, PROTOTIPAGEM E AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO COMPORTAMENTO HIDRODINÂMICO DE REATORES FOTOQUÍMICOS CIRCULARES

Larissa Pinheiro de Souza¹, Bruno Ramos^{1,2}, Antonio Carlos Silva Costa Teixeira¹

¹Grupo de Pesquisa em Processos Oxidativos Avançados, Departamento de Engenharia Química, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil (larissapdesouza@usp.br)

²Centro de Pesquisa para Inovação em Gás, Departamento de Engenharia Metalúrgica e de Materiais, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil

No presente trabalho projetou-se, prototipou-se e avaliou-se o comportamento hidrodinâmico, através do método de traçador pulso, de dois reatores fotoquímicos com diferentes *designs*. Um comportamento não ideal foi observado em ambos os reatores, atribuindo-se a fuga da idealidade à presença de retromistura, curtos-circuitos e zonas mortas. Esses efeitos foram mais evidenciados para o reator plano e permitiu que o reator caracol fosse mais viável para aplicação prática em sistemas fotoquímicos.

Palavras-chave: Prototipagem de Reatores; Impressão 3D; Reatores Fotoquímicos; DTR; Hidrodinâmica de Reatores.

INTRODUÇÃO

Desde sua concepção, a Engenharia Química sempre esteve na vanguarda das evoluções tecnológicas para acompanhar as demandas sociais e econômicas. O advento da Indústria 4.0 – acompanhando a expansão recente de tecnologias de manufatura aditiva, interfaces homem-máquina, computação em nuvem, inteligência artificial, IoT, *big data*, e outros termos ainda tão recentes que sequer existem em nosso idioma (Culot et al., 2020; Meindl et al., 2021) – também trouxe a nós grandes desafios a serem trabalhados.

A motivação central da Indústria 4.0 é a *eficiência*; que, em uma realidade de preocupação constante com a qualidade do meio-ambiente, deve incluir elementos de *sustentabilidade* (Pistikopoulos et al., 2021). Estes elementos devem estar presentes no projeto de uma planta industrial, e em todas as etapas dos processos individuais. Neste contexto, ressalta-se que a escolha do *design* de reatores é um ponto fundamental para o desenvolvimento de processos: cada tipo de sistema requer condições específicas desses equipamentos (Shi, 2014; Levenspiel, 2000).

Parte dos esforços em garantir a sustentabilidade dos processos químicos envolve a exploração das chamadas *novas janelas de processo* (Hessel et al., 2015), isto é, novas fontes de energia, matérias-primas e/ou equipamentos que permitam a obtenção de resultados de interesse com menor pegada ambiental. Neste contexto, o uso de fôtons como

fonte de energia vem ganhando espaço (Bonfield et al., 2020), seja na síntese de novos produtos – como precursores de interesse industrial (El-Khouly et al., 2017) – seja em processos de degradação de contaminantes químicos e (Tony, 2021), uma aplicação que ganhou importância ao longo do período de emergência sanitária que vivemos (Nardell, 2021). Os processos fotoquímicos vêm sendo usados industrialmente, especialmente quando relacionados às etapas de descontaminação de águas e efluentes industriais (Dotson et al., 2012). Todavia, a ampliação do uso desses processos depende do aumento de sua eficiência (Oppenländer, 2003), que está diretamente relacionado ao desenvolvimento de reatores com *designs* que possam ser cada vez mais adequados a uma exposição prolongada e eficiente do fluido à radiação UV-visível (Sundar and Kanmani, 2020).

Considerando as restrições impostas pela necessidade do transporte radiativo dos fôtons, reatores fotoquímicos são fabricados em diversas formas e configurações, dependendo principalmente da geometria da fonte radiante e da composição do meio reacional (Abdel-Maksoud et al., 2016; Cassano et al., 1995; Ramos et al., 2021). A Figura 1 ilustra algumas configurações possíveis.

A não-idealidade dos reatores reais é uma característica marcante desses equipamentos, necessitando assim de um prévio estudo para a sua devida aplicação prática (Fogler, 2009). Dessa maneira, Schmal (2010) destaca que há duas formas

de caracterizar a não-idealidade de reatores químicos: (1) Através do estudo dos efeitos de dispersão que causam o afastamento da idealidade (análise da distribuição de tempos de residência); e (2) Pela análise das equações básicas de quantidade de movimento, energia e massa devido aos efeitos difusivos e convectivos.

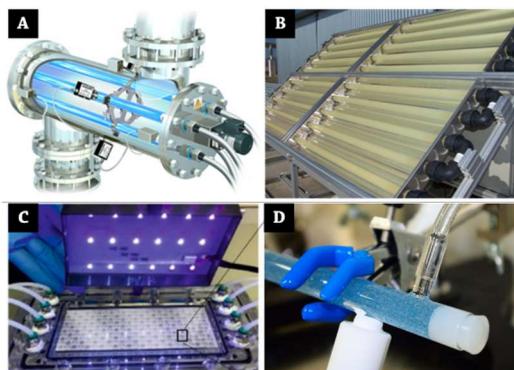


Figura 1. Exemplos de desenhos de reatores fotoquímicos comumente utilizados. (A) reator tubular com lâmpadas imersas (Euwa H. H. Eumann GmbH); (B) reator solar de coletores parabólicos compostos CADOX (Plataforma Solar de Almería); (C) reator com irradiação por LEDs de alta eficiência NETmix (Passalía et al., 2020); (D) reator tubular microestruturado para fotocatálise solar (Ramos et al., 2015)

A determinação da distribuição do tempo de residência tem sido uma metodologia amplamente aplicada para esse fim, além de ser um método experimental relativamente simples e confiável (Rodrigues, 2021). Esse método é baseado na determinação do tempo de residência médio (t_m) que leva em consideração o tempo (t) que cada elemento de fluido ou conjunto de moléculas passa pelo volume do reator, ou seja, a vazão do reator (v_0). O tempo médio pode ser igual ao tempo espacial (τ), se a velocidade de escoamento for uniforme numa secção transversal, como é o caso de um reator PFR ideal.

Como uma forma de comparar as curvas obtidas experimentalmente às do modelo de escoamento ideal é razoável a representação através dos modelos matemáticos de forma a determinar o quanto distante esses escoamentos reais estão de situações ideais (Levenspiel, 2000).

A avaliação experimental de diferentes projetos é possível graças ao advento de técnicas rápidas e de baixo custo de prototipagem, como a manufatura aditiva, ou *impressão 3D* (Au et al., 2016). Várias técnicas são agrupadas sob essa alcunha, dependendo

do tipo do material-base para a prototipagem, e da fundamentação da técnica de construção (Jyothish Kumar et al., 2018). A técnica mais comumente utilizada atualmente (Sculpteo, 2020) é a *deposição de filamento fundido*, FDM, baseada na fusão controlada de um filamento de material termoplástico e sua deposição sobre uma superfície seguindo uma geometria pré-estabelecida (Turner and Gold, 2015).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo projetar e prototipar dois reatores com janela de irradiação circular e desenho de escoamento diferentes e avaliar o comportamento hidrodinâmico de cada um deles através da análise de distribuição de tempos de residência, verificando assim a viabilidade de aplicação prática dos reatores estudados em condições de desenvolvimento das reações fotoquímicas.

MATERIAL E MÉTODOS

Projeto e Prototipagem dos Reatores

O projeto dos reatores foi desenvolvido através da criação de desenhos modulares unitários, preparados previamente pelo software 2D CAD (Autodesk, AutoCAD 2021) e editados pelo software 3D Inventor (Autodesk, Inventor Profissional 2021), com entrada do fluido de forma transversal e geometria circular de forma a permitir uma melhor estrutura para o campo de fluxo do escoamento (Peres, 2015). Visou-se adotar uma construção em módulos a fim de facilitar a associação de diferentes processos de forma eficaz e compacta.

Os reatores foram prototipados em acrilonitrila butadieno estireno (ABS) sustentável, obtido através da reciclagem de resíduos de impressão 3D e de peças automotivas (PrintGreen 3D). A fabricação das peças foi realizada por deposição de filamento fundido em uma extrusora de câmara aquecida (Creator Pro; Flashforge, Inc.). A extrusão foi conduzida sob temperatura de bico de 220 °C, a uma velocidade de 50 mm s⁻¹ sobre uma plataforma aquecida a 100 °C em camadas de 120 µm. A geometria de cada um dos reatores foi construída na forma de uma peça única, que foi processada em software proprietário (FlashPrint; Flashforge, Inc.) para fatiamento da geometria e preparação das instruções de impressão (código-G). Utilizou-se preenchimento de 90% (com padrões hexagonais); o que, associado ao uso de cinco camadas sólidas para a superfície de escoamento e cinco camadas de paredes, garante a estanqueidade da peça sob condições padronizadas de operação.

O reator 1 ou reator plano ($V_{RI} = 25.0$ mL) apresenta uma janela em vidro borossilicato ($d_G = 80$ mm) de 1,0 mm de espessura, uma folha de vedação em

etileno acetato de vinila ($d_{EVA} = 100$ mm) de 0,5 mm de espessura e duas peças em ABS (topo e fundo) ($d_{R1} = 100$ mm \times e = 7,5 mm) (Figura 2a). Já o reator 2 ou reator caracol ($V_{R2} = 8,0$ mL) apresenta uma janela em vidro borossilicato nas mesmas dimensões do reator 1, e uma peça única em ABS ($d_{R2} = 100$ mm \times e = 15 mm) preenchida internamente com um canal em forma de espiral, conforme ilustrado na Figura 2b.



Figura 2. *Design* dos reatores. a) Reator plano; b) Reator caracol.

Determinação da Distribuição de Tempos de Residência (DTR)

Os ensaios de DTR foram realizados nos dois protótipos de reator (reator plano e caracol), separadamente, à temperatura ambiente, de aproximadamente 25 °C, e sob vazão de alimentação de 2,0 mL min⁻¹ proporcionada por uma bomba dosadora com êmbolo (LC-10 AD, Shimadzu Co.). Uma solução concentrada de alaranjado de metila (Merck) de $8,51 \times 10^{-4}$ mol L⁻¹ foi preparada para ser usada como traçador colorimétrico, tendo a água como o fluido de transporte.

Os perfis de concentração utilizados para o cálculo da DTR foram obtidos a partir da aplicação da metodologia de traçador em pulso. Neste método, o traçador colorimétrico foi injetado na forma de pulso diretamente na entrada dos reatores com o auxílio de uma seringa com volume de aproximadamente 100 µL equipada com uma agulha. A saída do reator foi conectada em linha com uma célula de transmissão acoplada a um espectrofotômetro UV-Vis (Cary 50, Varian Inc.). As leituras foram realizadas em tempos pré-determinados, no comprimento de onda de absorção máxima do traçador em pH neutro (464 nm).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O custo dos protótipos obtidos é dado na Tabela 1, em função dos principais parâmetros que compõem

seu cálculo (tempo de impressão e consumo de materiais).

Tabela 1. Parâmetros de eficiência da prototipagem dos reatores estudados neste trabalho

Peça	Tempo de impressão (h)	Consumo de material (g)	Custo (R\$)
Plano (R1): base	5,56	49,53	6,63
Plano (R1): topo	1,55	15,00	1,98
Caracol (R2)	17,72	113,86	16,29

É possível notar que o aumento de complexidade da geometria acarreta um aumento nos parâmetros de custo de prototipagem, resultando em custos maiores. A Tabela 2 ilustra os desvios de volume esperados e real. É possível notar que a maior estruturação do volume de escoamento resultou em um desvio maior da geometria do projeto. Esse desvio é esperado, uma vez que esta geometria requer a fabricação de canais de diâmetro interno bastante estreitos (1,0 mm), sendo mais sensível às limitações de imprecisão de impressão (0,12 mm de espessura por camada) (Msalle et al., 2020).

Tabela 2. Parâmetros de eficiência da prototipagem dos reatores estudados neste trabalho

Reator	Volume teórico (mL)	Volume real (mL)	Desvio
Plano (R1)	24,7	25,0	+1,1%
Caracol (R2)	11,6	8,0	-31,0%

Com relação ao comportamento hidrodinâmico, a análise das absorbâncias permitiu determinar as concentrações do traçador ao longo do tempo e em seguida calcular a distribuição de tempos de residência ($E(t)$) e a distribuição cumulativa ($F(t)$) para os reatores em estudo, conforme apresentado nas Figuras 3 e 4, bem como calcular os parâmetros (Tabela 3) de cada sistema de forma a caracterizar cada distribuição.

A metodologia dos cálculos pode ser traduzida nas principais equações seguintes (Fogler, 2009 e Schmal, 2010). O tempo espacial é dado por:

$$\tau = \frac{V}{v_0} \quad (1)$$

Em que V (m³) é volume do reator, e v_0 é a vazão do escoamento (m³ h⁻¹). O tempo de residência médio t_m , por sua vez, é calculado em função da curva de saída $E(t)$:

$$t_m = \frac{\int_0^\infty t E(t) dt}{\int_0^\infty E(t) dt} = \int_0^\infty t E(t) dt \quad (2)$$

$E(t)$ é a *função de distribuição* de tempos de residência, determinada a partir do perfil de concentração do traçador medido na saída do reator:

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^\infty C(t) dt} \quad (3)$$

A partir dessa distribuição, pode-se calcular a função de distribuição cumulativa do traçador, $F(t)$, como:

$$F(t) = \int_0^t E(t) dt \quad (4)$$

$$1 - F(t) = \int_t^\infty E(t) dt \quad (5)$$

A partir de $E(t)$, pode-se calcular a variância (σ^2) e a distorção (s^3) da distribuição, indicando a qualidade hidrodinâmica do escoamento:

$$\sigma^2 = \int_0^\infty (t - t_m)^2 E(t) dt \quad (6)$$

$$s^3 = \frac{1}{\sigma^2} \int_0^\infty (t - t_m)^3 E(t) dt \quad (7)$$

Tabela 3. Parâmetros DTR calculados para os reatores fotoquímicos.

Tipo de Reator	t_m (min)	σ^2	s^3	τ (min)
Plano (R1)	11,52	13,96	-3,99	12,5
Caracol (R2)	4,46	3,58	4,07	4,0

DTR do Reator Plano

De acordo com a Figura 3 é possível perceber que o reator plano apresenta um perfil de três picos que caracteriza a presença de elevada retromistura, também detectada através da curva de $F(t)$ que não apresenta um crescimento exponencial, indicando que ocorre um retorno das moléculas do fluido para o interior do reator (Levenspiel, 2000).

Através de uma análise dos parâmetros calculados (Tabela 3), é possível destacar que esse módulo exibe caminhos preferenciais ou curtos-circuitos devido ao valor de t_m ser menor que τ ($t_m - \tau = -0,98$). Logo,

essa fuga da idealidade está intimamente associada com a presença das retromisturas e curtos-circuitos (Schmal, 2010; Levenspiel, 2000). Outra forma de verificar essa não idealidade é observar o expressivo valor de variância da distribuição (σ^2), indicando uma dispersão dos valores médios, o que pode também ser notado através da largura das curvas formadas. Outro ponto interessante de observar é a distorção da distribuição em relação à média (s^3), evidenciando uma inclinação dos valores para a esquerda.

Em termos de aplicação prática, esse reator não seria tão indicado para um sistema fotoquímico. Isso se dá devido a elevada presença de retromistura no sistema que poderia promover combinações de espécies presentes em diferentes estágios do processo de degradação, ocasionando a formação de subprodutos com potencial de igual ou maior toxicidade em relação aos compostos iniciais (Oppenländer, 2003). Com essa possibilidade de formação de subprodutos com elevada toxicidade, a aplicação desse módulo como parte de uma sequência de reatores em cadeia ficaria também inviabilizada.

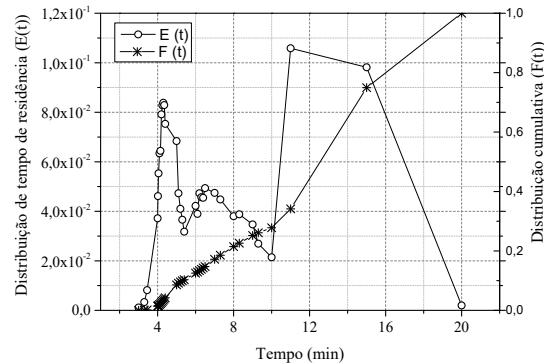


Figura 3. DTR ($E(t)$) e Distribuição cumulativa ($F(t)$) em função do tempo para reator plano. $v_0 = 2 \text{ mL min}^{-1}$.

DTR do Reator Caracol

Através da Figura 4, é possível observar que o reator caracol exibe um comportamento distinto do reator plano, mostrado na Figura 3 quanto a sua distribuição de tempo de residência. O reator caracol apresenta um único pico, bastante elevado, que lembra um pulso (Figura 4). Por outro lado, sua cauda muito longa remete à presença de possíveis zonas mortas (Schmal, 2010). Contudo, é possível observar através da curva $F(t)$ que um retorno de moléculas não ocorre para o interior do reator, caracterizando uma curva exponencial e cumulativa (inexistência da retromistura no sistema).

Ao comparar os valores de parâmetros na Tabela 3 para o reator caracol é possível observar que o valor de t_m é maior que τ ($t_m - \tau = 0,46$), corroborando com a hipótese da existência de regiões onde ocorrem baixas trocas de massa e pequenas quantidades de movimento em regiões adjacentes (zonas mortas). Apesar da fuga da idealidade ser expressa apenas pelo efeito das zonas mortas, ao analisar σ^2 e s^3 é possível inferir que ainda existe um afastamento da distribuição com relação aos valores médios (Tabela 3). Contudo, esses valores são bem menos expressivos que os mesmos valores dos parâmetros calculados para o reator plano.

Apesar das zonas mortas presentes no reator caracol, a inexistência da retromistura torna-o mais adequado para a aplicação prática em sistemas fotoquímicos. Contudo, observa-se que esse distanciamento da idealidade poderia ser ainda suavizado com o desenvolvimento de *design* ainda mais adequado, evitando a expressiva formação das zonas mortas na entrada e saída do reator.

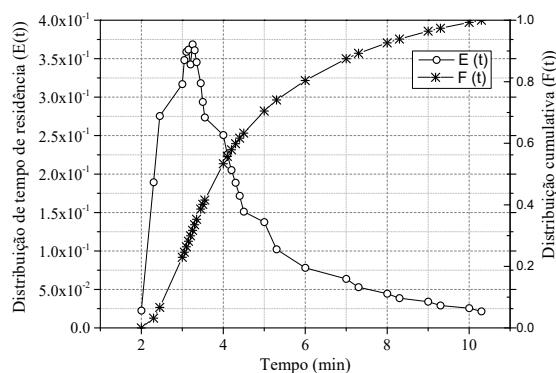


Figura 4. DTR ($E(t)$) e Distribuição cumulativa ($F(t)$) em função do tempo para reator caracol. $v_0 = 2 \text{ mL min}^{-1}$.

Comparando os resultados obtidos para os diferentes reatores é razoável inferir que eles apresentam um desvio considerável da idealidade, sendo esse mais expressivo para o reator plano. Observando a forma das curvas de distribuição de tempo de residência e os valores dos parâmetros calculados, é possível associar esses dois reatores com modelos ideais, estando o reator plano mais próximo de um reator ideal do tipo CSTR e o reator caracol a um reator ideal do tipo PFR (Schmal, 2010; Fogler, 2009).

CONCLUSÃO

A prototipagem por impressão 3D permitiu a fabricação e o estudo hidrodinâmico de diferentes *designs* alternativos para um reator fotoquímico com irradiação por janela circular. A análise de DTR

mostrou-se uma metodologia adequada de análise do escoamento nos reatores estudados. Ambos os módulos apresentaram comportamentos que fogem da idealidade, sendo o reator plano mais expressivo nesse sentido devido à presença de curto-círcuito e retromistura. Portanto, em termos de aplicação prática relacionada aos sistemas fotoquímicos, o reator caracol apresentou-se mais adequado, com a estruturação e o direcionamento do escoamento possibilitando a redução do volume devido a zonas mortas. Contudo, através da elaboração de novos *designs* será possível suavizar os efeitos de fuga da idealidade ainda encontrados no reator caracol devido às zonas mortas ainda presentes.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES, Brasil) pelo apoio financeiro, bem como ao apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (projetos FAPESP 2019/24158-9 e 2018/21271-6) e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico - Brasil (CNPq) (processos 307481/2017-4 e 311230/2020-2).

REFERÊNCIAS

- ABDEL-MAKSoud, Yasmine; IMAM, Emad; RAMADAN, Adham. TiO_2 solar photocatalytic reactor systems: Selection of reactor design for scale-up and commercialization - analytical review. *Catalysts*, v.6, n.9, p.138, set. 2016.
- AU, Anthony K.; HUYNH, Wilson; HOROWITZ, Lisa F.; FOLCH, Albert. 3D-Printed Microfluidics. *Angewandte Chemie International Edition*, v.55, p. 3862–3881, 2016.
- BONFIELD, Holly E.; KNAUBER, Thomas; LÉVESQUE, François; MOSCHETTA, Eric G.; SUSANNE, Flavien; EDWARDS, Lee J. Photons as a 21st century reagent. *Nature Communications*, v.11, n. 804, p. 2–5, 2020.
- CASSANO, Alberto E.; MARTIN, Carlos A.; BRANDI, Rodolfo J.; ALFANO, Orlando M. Photoreactor Analysis and Design: Fundamentals and Applications. *Industrial Engineering Chemistry Research*, v.34, p.2155–2201, 1995.
- CULOT, Giovanna; NASSIMBENI, Guido; ORZES, Guido; SARTOR, Marco. Behind the definition of Industry 4.0: Analysis and open questions. *International Journal of Production Economics*, v.226, n.107617, 2020.
- DOTSON, Aaron D.; RODRIGUEZ, Caitlin E.; LINDEM, Karl G. UV disinfection implementation

status in US water treatment plants. **Journal American Water Works Association**, v.104, n.5, p.E318-E324, 2012.

EL-KHOULY, Mohamed E.; EL-MOHSNAWY, Eithar; FUKUZUMI, Shunichi. Solar energy conversion: From natural to artificial photosynthesis. **Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews**, v.31, p.36–83, 2017.

FOGLER, H. Scott. **Elementos de Engenharia das Reações Químicas**. 4.ed. Rio de Janeiro: Ltc, 2009.

HESSEL, Volker; KRALISHCH, Dana; KOCKMANN, Norbert. **Novel Process Windows: Innovative Gates to Intensified and Sustainable Chemical Processes**. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2015.

JYOTHISH Kumar, L.; PANDEY, Pulak M.; WIMPENNY, David I. **3D printing and additive manufacturing technologies**. Springer, 2018.

LEVENSPIEL, Octave. **Engenharia das Reações Químicas**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2000.

MEJNDL, Benjamin; AYALA, Néstor F.; MENDONÇA, Joana; FRANK, Alejandro G. The four smarts of Industry 4.0: Evolution of ten years of research and future perspectives. **Technological Forecasting and Social Change**, v.168, n.120784, 2021.

MSALLEM, Bilal; SHARMA, Neha; CAO, Shuaishuai; HALBEISEN, Florian S.; ZEILHOFER, Hans-Florian; THIERINGER, Florian M. Evaluation of the Dimensional Accuracy of 3D-Printed Anatomical Mandibular Models Using FFF, SLA, SLS, MJ, and BJ Printing Technology. **Journal of Clinical Medicine**, v.9, n. 3, p.817, 2020.

NARDELL, Edward A. Air Disinfection for Airborne Infection Control with a Focus on COVID-19: Why Germicidal UV is Essential. **Photochemistry and Photobiology**, 2021.

OPPENLÄNDER, Thomas. **Photochemical Purification of Water and Air**. Darmstadt: Wiley-VCH, 2003.

PASSALÍA, Claudio; FLORES, Marina; SANTOS, Sara G.S.; PAULISTA, Larissa O.; LABAS, Marisol D.; VILAR, Vítor J.P.; BRANDI, Rodolfo J. Radiation modelling in the NETmix photocatalytic reactor: The concept of efficiencies in series. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.8, n.6, 2020.

PERES, José C.G.; SILVIO, Uirá; TEIXEIRA, Antonio C.S.C.; GUARDANI, Roberto; VIANNA JR, Ardson S. Study of an Annular Photoreactor with Tangential Inlet and Outlet: I. Fluid Dynamics.

Chemical Engineering & Technology, v. 38, n. 2, p. 311–318, 2015.

PISTIKOPOULOS, E.N.; BARBOSA-POVOA, Ana; LEE, Jay H.; MISENER, Ruth; MITSOS, Alexander; REKLAITIS, G.V.; VENKATASUBRAMANIAN, V.; YOU, Fengqi; GANI, Rafiqul. Process systems engineering – The generation next? **Computers & Chemical Engineering**, v. 147, n. 107252, 2021.

RAMOS, Bruno; CARNEIRO, João G.M.; NAGAMATI, Leandro I.; TEIXEIRA, Antonio C.S.C. Development of intensified flat-plate packed-bed solar reactors for heterogeneous photocatalysis. **Environmental Science and Pollution Research**, 2021.

RAMOS, Bruno; OOKAWARA, Shinichi; MATSUSHITA, Yoshihisa; YOSHIKAWA, Shiro. Intensification of solar photocatalysis with immobilised TiO₂ by using micro-structured reaction spaces. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 3, p. 681–688, 2015.

RODRIGUES, Alírio E. Residence time distribution (RTD) revisited. **Chemical Engineering Science**, v. 230, n.116188, 2021.

SCHMAL, Martin. **Cinética e Reatores: Aplicação na Engenharia Química: Teoria e Exercícios**. Rio de Janeiro: Synergia, 2010.

SCULPTEO, **The state of 3D printing 2020**. 23, 2020.

SHI, Fan. **Reactor and Process Design in Sustainable Energy Technology, Reactor and Process Design in Sustainable Energy Technology**, 2014.

SUNDAR, Kaviya P.; KANMANI, S. Progression of Photocatalytic reactors and it's comparison: A Review. **Chemical Engineering Research Design**, v.154, p.135–150, 2020.

TONY, MAHA. Solar concentration for green environmental remediation opportunity - international review: advances, constraints, and their practice in wastewater treatment. **International Journal of Environmental Analytical Chemistry**, 2021.

TURNER, B.N., GOLD, S.A. A review of melt extrusion additive manufacturing processes: II. Materials, dimensional accuracy, and surface roughness. **Rapid Prototyping Journal**, v.21, p.250–261, 2015.