

SIMULAÇÃO DA FLUIDODINÂMICA DE UM *BLEND* DE PROTEÍNAS VEGETAIS EM LEITO FLUIDIZADO PARA PRODUÇÃO DE PÓS ALIMENTÍCIOS

Luísa Branco Martineli ¹; José Carlos Gonçalves Peres ²

¹ Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

² Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT).

Resumo. *As proteínas de arroz e de ervilha são adequadas para a nutrição humana por terem juntas todo o perfil de aminoácidos essenciais. O objetivo desse trabalho foi simular a movimentação de um blend de proteínas vegetais de ervilha e de arroz em um leito fluidizado por meio da fluidodinâmica computacional (CFD), com o intuito de determinar a velocidade mínima de fluidização do blend, além de verificar a tendência de elutriação e a formação de zonas mortas. Foi utilizado um modelo em falso 2D com uma malha poliédrica para o domínio computacional, o modelo euleriano granular para observar a movimentação das partículas fluidizadas à temperatura ambiente e o modelo de Syamlal-O'Brien como coeficiente de arraste. As simulações mostraram que velocidades de ar acima de $1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ promoveram elutriação das partículas, apesar de não ter formação de zonas mortas, ao passo que velocidades entre $0,001$ e $0,005 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ mostraram pouca expansão do leito. A velocidade mínima de fluidização prevista para o blend de proteínas é de $0,002 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, valor coerente com a correlação de Wen e Yu.*

Introdução

Pesquisas de mercado apontam que oito em cada dez brasileiros se esforçam para manter uma alimentação saudável. Além disso, 71 % afirmam que preferem produtos mais saudáveis, mesmo que tenham que pagar mais por eles (Cruz, 2018). Hoje em dia termos como veganismo e vegetarianismo são muito relevantes e isso tende a crescer seguido da preocupação do consumidor com a saúde e a qualidade de vida.

Poore e Nemecek (2018) estudaram os impactos da produção de alimentos ao meio ambiente. Os pesquisadores conseguiram identificar quais são os alimentos que mais causam desperdício de água, impacto na terra e emissões de gases estufa, como dióxido de carbono. Sem a produção de carne e laticínios o uso total de terras para abastecer a população mundial cairia 75 %. Além disso, eles também utilizam 83 % de toda a área cultivável e produzem 60 % dos gases do efeito estufa produzidos no agronegócio. Os autores concluíram que uma dieta vegana é provavelmente a melhor maneira de reduzir seu impacto no planeta Terra, não apenas gases do efeito estufa, mas acidificação global, eutrofização, uso da terra e uso da água.

Uma boa alternativa para a dieta vegana são as proteínas vegetais. As proteínas provenientes da ervilha e do arroz possuem propriedades nutritivas e funcionais, trazendo inúmeros benefícios para a saúde (Saunders, 1990; Pietrysiaka *et al.*, 2018). Estas proteínas têm atraído a atenção da indústria e de grupos de pesquisa porque são ricas em aminoácidos essenciais e também são isentas de glúten e de lactose, ampliando seu potencial mercado consumidor para indivíduos com intolerâncias alimentares e/ou dietas vegetarianas e veganas (Juliano, 1993; Salata *et al.*, 2011; Campos, 2014).

As proteínas de ervilha e arroz são normalmente comercializadas na forma de pó. As partículas são muito finas e *in natura* são pouco solúveis, com baixa molhabilidade e fluidez. A fim de melhorar esses parâmetros e as propriedades organolépticas é realizada a aglomeração das partículas em um leito fluidizado. O aumento do tamanho das partículas é resultado da sucessão das etapas de umedecimento, colisão, consolidação, coalescência e secagem, que são ocasionadas pela atomização de um ligante sobre partículas movimentadas por ar quente (Turchiuli *et al.*, 2013).

O objetivo deste trabalho é simular a movimentação de um *blend* de proteínas vegetais, com diâmetro médio de 71,949 μm e fluidizadas por ar à temperatura ambiente através da fluidodinâmica computacional - CFD. Pretende-se verificar como a velocidade de ar de fluidização impacta na existência de zonas mortas e na ocorrência de elutriação das partículas. Além disso, propõe-se estimar numericamente a velocidade mínima de fluidização das partículas e verificar a acuidade da simulação através de correlações da literatura.

Material e Métodos

O leito utilizado para produzir o *blend* de proteínas vegetais de ervilha e de arroz é composto por uma base cônica metálica com uma altura de 15 cm e possui, acima, um tubo cilíndrico com 50 cm de altura e 14 cm de diâmetro interno, como representado na Figura 1.

Na parte inferior da base cônica há uma placa perfurada que promove uma distribuição de ar mais uniforme. Acima da placa é instalada uma tela de aço inoxidável com abertura de 33,0 μm para evitar que as partículas passem para a parte interna do leito. Com o intuito de simplificar as simulações foi adotado um domínio computacional a partir da base cônica, acima da tela, até a parte superior do tubo cilíndrico. Essa representação foi feita pelo ANSYS SpaceClaim 2019 R3 empregado um modelo de falso 2D, ou seja, bidimensional com profundidade de 1 mm (Figura 2).



Figura 1- Leito fluidizado utilizada para a produção do *blend* de proteínas vegetais de ervilha e de arroz.

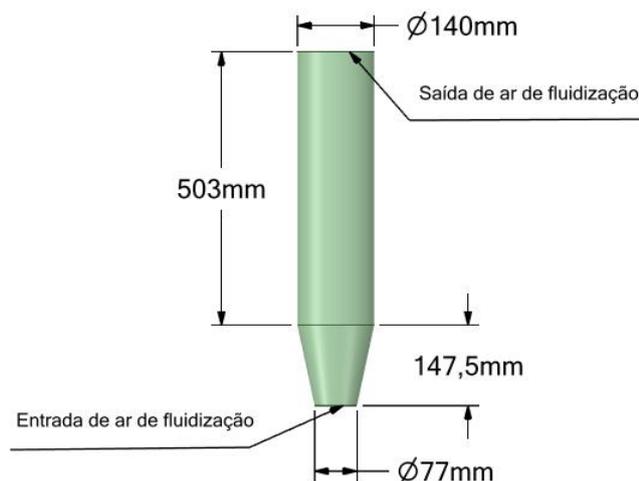


Figura 2 - Representação do domínio computacional para as simulações.

As simulações do escoamento multifásico, realizadas no ANSYS Fluent 2019 R3, consideraram regime transiente, escoamento laminar e sob condições isotérmicas. O domínio computacional foi dividido com malhas poliédricas por permitirem a adoção de um passo de tempo maior sem desestabilizar o processo de convergência da solução. O passo de tempo foi variado entre $1 \cdot 10^{-6}$ s a $1 \cdot 10^{-4}$ s para determinar o maior valor que permitia a estabilidade do processo de convergência.

O modelo utilizado nas simulações foi o euleriano granular, que considera todas as fases como contínuas e completamente interpenetrantes (MARINI, 2008). Neste modelo são resolvidas as equações da continuidade e de Navier-Stokes para cada fase presente, ponderadas pela respectiva fração volumétrica.

O ar de fluidização foi alimentado na base do leito a $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e tratado como gás ideal e incompressível com propriedades constantes. No instante inicial das simulações, as partículas ocuparam uma altura de 10 cm, medidos a partir da parte inferior da base cônica, e a fase gasosa estava em repouso. As densidades bulk e aparente do *blend* de proteínas são $1108,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ e $509,7 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$, respectivamente, o que corresponde a uma fração volumétrica inicial das partículas de 0,46.

O modelo de arraste utilizado foi o de Syamlal-O'Brien (1989), baseado na medição das velocidades terminais das partículas em leito fluidizados, através de correlações entre a fração volumétrica da fase sólida e do número de Reynolds das partículas. A modelagem da força de arrasto é baseada nas forças que atuam sobre uma partícula individual corrigidas pelo formato da partícula e da presença de outras partículas ao seu redor.

A fim de definir a discretização ótima do domínio computacional, foi realizado um estudo de convergência de malhas através do método *grid convergence index*, GCI (CELIK et al., 2008). Para a malha em falso 2D, foram analisadas três quantidades de elementos poliédricos – malhas grossas, médias e finas, obtidas variando o tamanho médio de aresta dos elementos. O estudo foi realizado comparando a queda de pressão no leito após 2,0 segundos de simulação da fluidização das partículas com uma alimentação de ar de fluidização de $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e temperatura ambiente.

Com o intuito de determinar a velocidade mínima de fluidização das partículas, foram realizadas simulações com um tempo físico de 0,5 segundos e velocidade do ar de fluidização variando de $0,001 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a $0,005 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Essa faixa de velocidade foi determinada através da correlação de Wen e Yu (GREEN, PERRY, 2007), dada pela eq. (2), que utiliza os números de Reynolds, eq. (3), e de Arquimedes, eq. (1), das partículas para estimar a velocidade se mínima fluidização. Além disso, foi processada outra simulação de 2,0 segundos e com velocidade de $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para estimar a tendência de elutriação.

$$Ar = \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (1)$$

$$Re_{p,mf} = [(33,7)^2 + 0,0408 Ar]^{1/2} - 33,7 \quad (2)$$

$$Re = \frac{\rho_g v D}{\mu} \quad (3)$$

Resultados e Discussão

O método GCI foi aplicado para analisar a convergência da malha em falso 2D com três quantidades de elementos poliédricos. A Figura 3 representa a distribuição dos elementos na malha estudada e a Tabela 1 indica as métricas de qualidade, volume da geometria e a perda de carga. Recomenda-se que a qualidade ortogonal e a razão de aspecto sejam maiores que 0,02 e inferiores a 100, respectivamente (Tu, Yeoh e Liu, 2018), ou seja, todas as malhas satisfazem os critérios de qualidade. Para todas as malhas, observou-se que os passos de tempo adotados mantiveram a solução estável; desse modo, as demais simulações foram realizadas com passo de $1 \cdot 10^{-4}$ s para reduzir o tempo de processamento.

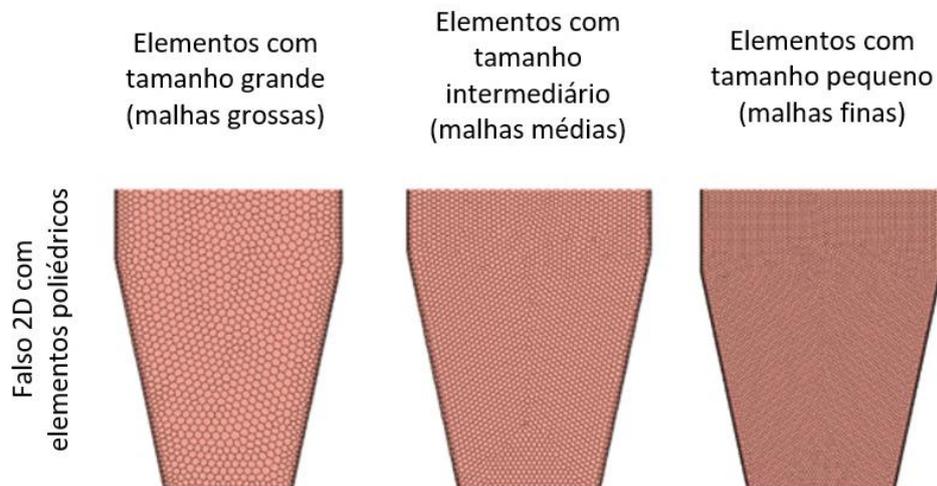


Figura 3 - Vista frontal das malhas empregadas para discretizar o leito fluidizado.

Tabela 1 - Caracterização das malhas empregadas na simulação da fluidodinâmica do *blend* de proteínas vegetais.

Malha	Número de elementos	Razão de aspecto máxima	Qualidade ortogonal mínima	Perda de carga (Pa)
Fina	81569	7,77	0,69	420,2
Média	26004	7,72	0,51	410,3
Grossa	12930	7,72	0,54	385,8

As malhas fina e média apresentam perda de carga semelhantes, com um erro de aproximação relativa de 2,36 %, apesar de terem o número de elementos significativamente diferentes. Já o erro entre as malhas grossa e média é de aproximadamente 6,0 %. Com isso, é possível verificar que a malha média é uma boa opção para as simulações, já que apresenta um resultado próximo à malha fina e um ganho significativo de performance computacional.

Na simulação com um tempo físico de 2,0 segundos e velocidade do ar de fluidização a $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ou superiores percebe-se que houve tendência de elutriação das partículas (Figura 4), ou seja, o escoamento do ar é intenso a ponto de arrastar as partículas para fora do leito.

Entretanto, após 1,0 segundo, não existem regiões com frações volumétricas maiores que 0,40, ou seja, essa velocidade consegue movimentar as partículas sem a formação de zonas mortas.

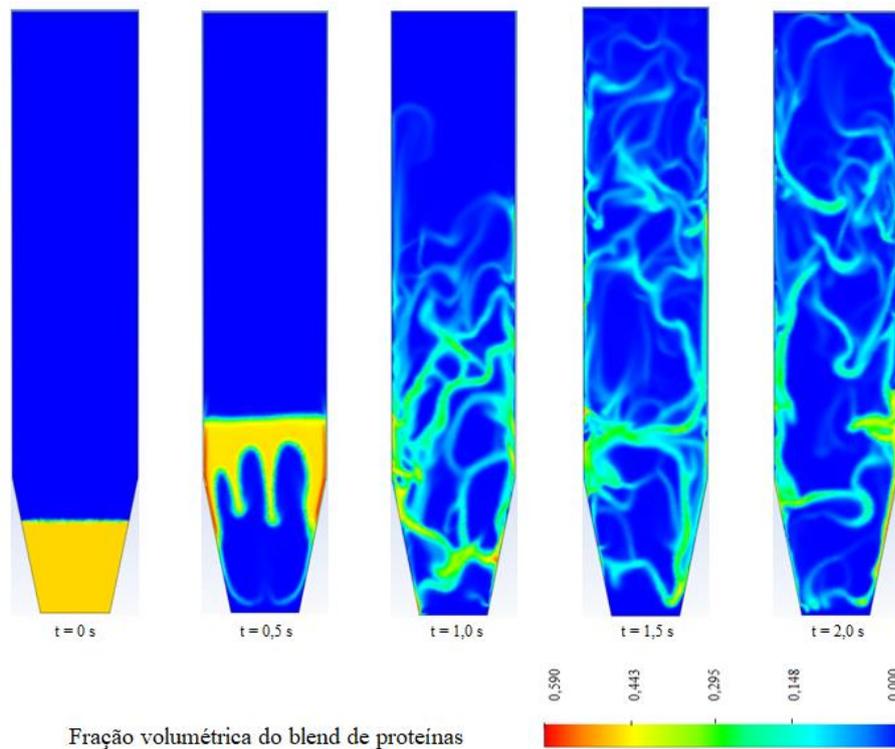


Figura 4 – Distribuição das partículas do *blend* de proteínas vegetais no leito fluidizado utilizando ar de fluidização a $1\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Através das simulações de $0,001$ a $0,005\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ levantou-se a curva de perda de carga no leito. Visto que o ponto de mínima fluidização ocorre quando, em uma faixa constante, há uma queda na perda de carga, a partir da Figura 5 é possível verificar que a velocidade de mínima fluidização é de $0,002\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Essa velocidade é comprovada pela correlação de Wen e Yu, onde o número de Arquimedes, número de Reynolds e a velocidade de mínima fluidização são $15,5$, $0,0094$ e $0,002\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, respectivamente. Contudo, essas velocidades promoveram pouca expansão do leito (Figura 6), podendo dificultar a mistura das partículas com o ligante a ser adicionada para promover a aglomeração.

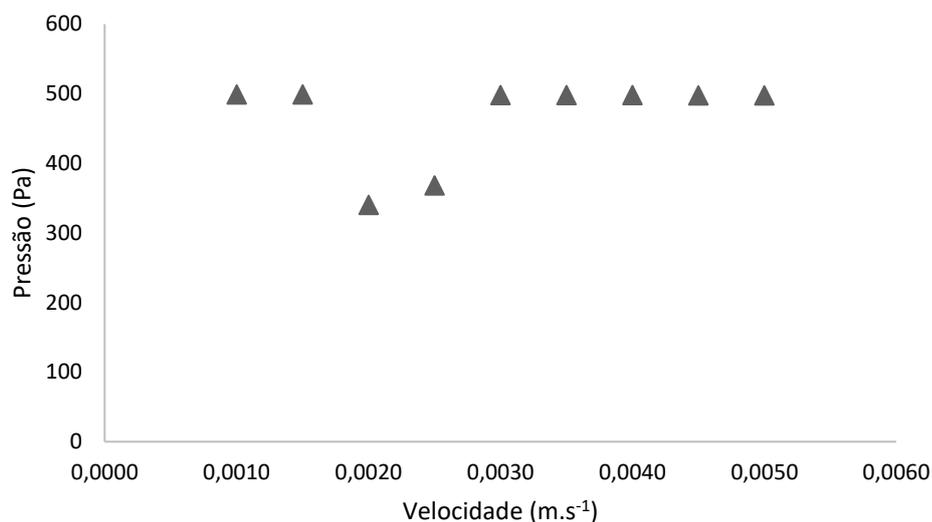


Figura 5 – Estimativa computacional da velocidade de mínima fluidização do blend de proteínas vegetais de arroz e de ervilha.

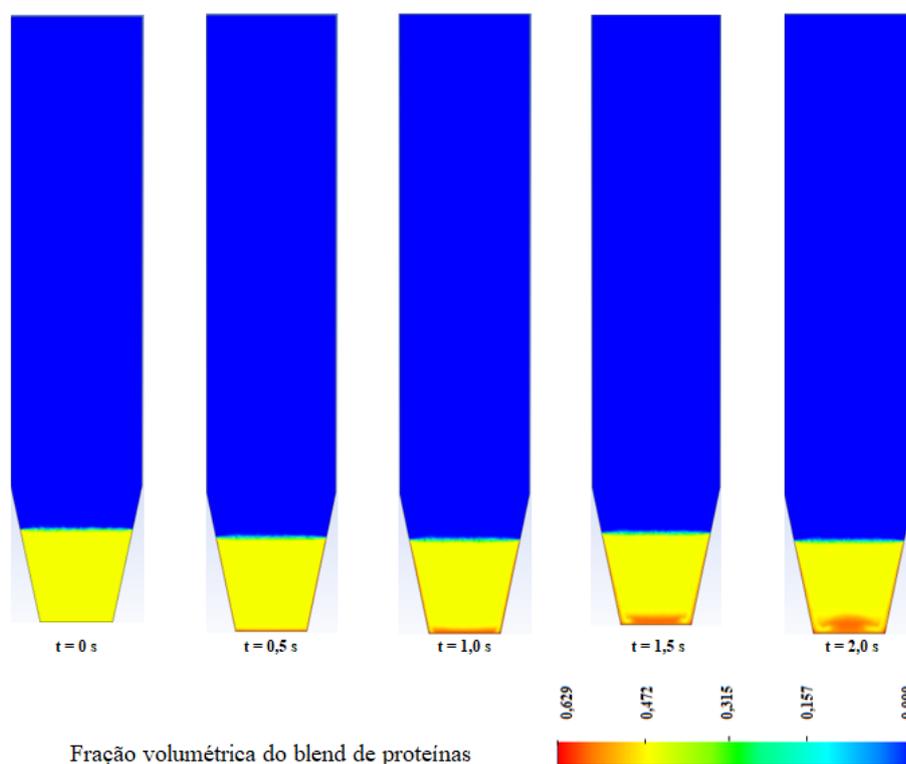


Figura 6 – Distribuição das partículas do *blend* de proteínas vegetais no leito fluidizado utilizando ar de fluidização a $0,001 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$

Conclusões

A aplicação da fluidodinâmica computacional permitiu avaliar como as condições de operação de um leito fluidizado afetaram a movimentação de um *blend* de proteínas vegetais de ervilha e de arroz. A adoção de malhas poliédricas viabilizou um passo de tempo de $1 \cdot 10^{-4} \text{ s}$ sem que a solução fosse desestabilizada. Não é interessante operar o leito com velocidades do ar de fluidização acima de $1,0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ porque a elutriação das partículas é intensa. As simulações

previram uma velocidade de mínima fluidização das partículas de $0,002 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, coerente com a correlação de Wen e Yu.

Nomenclatura

Ar	Número de Arquimedes, eq. (1) (adimensional)
d_p	Diâmetro efetivo da partícula (m)
g	Aceleração da gravidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$)
$Re_{p,mf}$	Número de Reynolds da partícula na condição de mínima fluidização (adimensional)
v	Velocidade ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Símbolos gregos

ρ_g	Densidade do ar ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
ρ_s	Densidade do sólido ($\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$)
μ	Viscosidade do ar ($\text{kg}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)

Referências Bibliográficas

- CAMPOS, A. M. B. T. C. Avaliação da diversidade genética de uma coleção portuguesa de ervilha (*Pisum sativum* L.) através de marcadores morfológicos e moleculares. 2014. 93 p. Dissertação (Mestrado em Agricultura Sustentável) — Instituto Politécnico de Portalegre, Escola Superior Agrária de Elvas. Elvas - Portugal, 2014
- CELIK, I. B.; GHIA, U.; ROACHE, P. J.; FREITAS, C. J.; COLEMAN, H.; RAAD, P. E. Procedure for Estimation and Reporting of Uncertainty Due to Discretization in CFD Applications. *Journal of Fluids Engineering*, v. 130, n. 7, p. 078001-1 — 078001-4, 2008.
- CRUZ, F. *Pesquisa mostra que 80% dos brasileiros buscam alimentação saudável*. Agência Brasil. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/saude/noticia/2018-05/pesquisa-mostra-que-80-dos-brasileiros-buscam-alimentacao-saudavel#:~:text=Oito%20em%20cada%20dez%20brasileiros,satisfeito%20com%20a%20pr%C3%B3pria%20alimenta%C3%A7%C3%A3o>>. Acesso em: 7 Nov. 2020.
- GREEN, Don W.; PERRY, Robert H. (org). *Perry's Chemical Engineer's Handbook*. 8th edition. New York: McGraw-Hill, 2007.
- JULIANO, B. O. Rice in human nutrition. Rome: FAO, 1993.
- MARINI, F. Simulação de um leito fluidizado aplicando a técnica CFD baseada na teoria cinética do escoamento granular - Universidade Estadual de Campinas, 2008.
- Pietrysiaka, E.; Smith, D.M.; Smith, B.M.; Ganjyal, G.M. (2018) Enhanced functionality of pea-rice protein isolate blends through direct steam injection processing. *Food Chemistry*, 243, 338-344
- POORE, J.; NEMECEK, T. Reducing food's environmental impacts through producers and consumers. *Science*, v. 360, n. 6392, p. 987–992, 2018. Disponível em: <<https://science.sciencemag.org/content/360/6392/987>>. Acesso em: 8 Nov. 2020.
- SALATA, A. C.; GODOY, A. R.; KANO, C.; HIGUTI, A. R. O.; CARDOSO, A. I. I.; EVANGELISTA, R. M. Produção e qualidade de frutos de ervilha torta submetidas a diferentes níveis de adubação potássica. *Nucleus*, v.8, n. 2, p. 127-135, 2011
- Saunders, R.M. (1990) The properties of rice bran as a food stuff. *Cereal Foods World*, 35, 632-636
- TU, J.; YEOH, G. H.; LIU, C. *Computational Fluid Dynamics – A Practical Approach*. Third Edition. New York: Butterworth-Heinemann, 2018
- Turchiuli, C.; Samil, R.; Dumoulin, E. (2013). Fluidized bed agglomeration of skim milk powder: Analysis of sampling for the follow-up of agglomerate growth. *Powder Technology*, 238, 161-168
- Universidade de Oxford: alimentação vegana é a forma mais efetiva de proteger o meio ambiente. *Vista-se.com.br*. Disponível em: <<https://www.vista-se.com.br/universidade-de-oxford-alimentacao-vegana-e-a-forma-mais-efetiva-de-protger-o-meio-ambiente/#:~:text=%E2%80%9CUma%20dieta%20vegana%20%C3%A9%20provavelmente,Poore%2C%20que%20liderou%20o%20estudo.>>. Acesso em: 8 Nov. 2020.