



ESTUDO EXPLORATÓRIO DA BIOSSECAGEM DO RESÍDUO CÍTRICO PROVENIENTE DA PRODUÇÃO DE SUCO DE LARANJA

VINÍCIUS C. D. da SILVA¹, ANTÔNIO C. L. HORTA¹, MARCOS P. FELIZARDO²,
GUSTAVO D. MAIA^{1*}

¹Universidade Federal de São Carlos UFSCar, Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Departamento de Engenharia Química

²Instituto Federal de Minas Gerais IFMG, Campus de Congonhas
Departamento de Mecânica

*e-mail: maia@ufscar.br

RESUMO – Resíduos sólidos industriais têm recebido especial atenção por parte de pesquisadores das mais diferentes áreas do conhecimento em função da necessidade de se encontrar soluções técnicas viáveis e ecologicamente adequadas para sua utilização. Processos que envolvem a valoração de resíduos sólidos orgânicos frequentemente necessitam de uma etapa de secagem, conservação e adequação do resíduo para posterior utilização. Considerando que a secagem convencional é significativamente dispendiosa, o presente trabalho realizou um estudo exploratório da biossecagem do resíduo cítrico proveniente da produção de suco de laranja. Foram estudadas três configurações de biossecagem: sistema completamente carregado com longo tempo de operação; sistema parcialmente carregado com curto tempo de operação e biossecagem intermitente com dois ciclos e homogeneização do leito. Como resultados obtidos, destacamos os picos de temperatura superiores a 50 °C na biossecagem com sistema totalmente carregado e superiores a 45 °C na biossecagem com carga parcial e em operação intermitente, com especial destaque para a significativa remoção de água na biossecagem intermitente. Foi possível concluir que a biossecagem constitui um processo promissor, e que estudos adicionais sobre as vazões de ar empregadas, tempo de intermitência e carga inicial de microrganismos são necessários para um melhor desenvolvimento desse tipo de sistema.

INTRODUÇÃO

O Brasil é, atualmente, o maior produtor de laranja do mundo, com uma produção anual de aproximadamente 18 milhões de toneladas. A indústria de suco de laranja produz cerca de 50% em massa de resíduo cítrico (bagaço, casca e sementes) como subproduto da fruta, com estimativa de 9 milhões de toneladas de resíduo sólido agroindustrial de laranja por ano. Este subproduto é obtido após duas prensagens, originando um resíduo com umidade em torno de 75% em base úmida (Lima et al., 2017).

Resíduo cítrico tem sido utilizado como pellets para ração animal, obtenção de

fertilizantes orgânicos, extração de pectina e óleos essenciais, obtenção de compostos antioxidantes e como substrato para a produção de diversos compostos com alto valor agregado, tais como proteínas microbianas, ácidos orgânicos, etanol 2G, enzimas e metabólitos secundários biologicamente ativos, além de fonte de energia através da queima de biomassa em processos de cogeração (Abecitrus, 2008).

Em todas as atividades citadas o resíduo deve ser previamente seco, visando sua preservação e impedindo sua degradação. Entretanto, processos convencionais de secagem em escala industrial são dispendiosos e consomem uma quantidade significativa de

energia comparativamente ao restante do processo.

Pensando nisso, uma alternativa à secagem convencional é o emprego de uma fonte biológica de calor para a remoção da água do sistema. Nesse processo, conhecido como biossecagem, os microrganismos presentes nos resíduos sólidos orgânicos geram calor devido à sua atividade metabólica, podendo atingir temperaturas de até 70°C (Sugni et al., 2005). Com isso há uma sensível redução no custo de operação uma vez que a biossecagem não necessita de fonte externa de calor (Adani et al., 2004).

Biossecadores têm sido aplicados com sucesso na secagem de resíduos sólidos orgânicos, como a secagem de estrume em fazendas de gado leiteiro (Wright, 2000), resíduos sólidos urbanos (Adani et al., 2002; Adani et al., 2004; Sugni et al., 2005; Rada et al., 2007; Rada, et al. 2010; Bilgin e Tulun, 2015; Tom et al., 2016) e industriais (Frei et al., 2004; Navaee-Ardeh et al., 2006; Gonzáles et al., 2019).

Entretanto, o número de pesquisas é escasso e há uma demanda crescente por estudos científicos que permitam uma melhor aplicação dessa tecnologia na secagem de resíduos sólidos orgânicos, sobretudo na compreensão da influência do fornecimento de ar na eficiência da remoção de água e promoção do aumento de temperatura do meio.

Dessa forma, o presente trabalho teve como objetivo a realização de um estudo exploratório a fim de avaliar o processo de biossecagem do resíduo da produção de suco de laranja, com especial atenção à configuração do sistema e a influência da vazão em parâmetros operacionais relevantes como o comportamento térmico, tempo de operação e a remoção de água do sistema.

MATERIAIS E MÉTODOS

Resíduo cítrico

Resíduo da produção de suco de laranja constituído de casca, bagaço, galhos e sementes foi adquirido junto à empresa Sucocítrico Cutrale na cidade de Araraquara – SP diretamente de sua planta com umidade inicial de 80% b.u. (Figura 1).

Moraes e Crestani (2018) mostraram que resíduo cítrico contém, em massa seca, 2,9±0,2% de cinzas, 19,3±0,9 de extrativos em solvente, 38,5±1,5% de celulose, 33,1±2,0% de holo celulose, 24,0±2,0% de hemicelulose e 2,9±0,5% de lignina.



Figura 1: Resíduo cítrico obtido junto da empresa Sucocítrico Cutrale – Araraquara-SP.

Aspectos técnicos da biossecagem

O processo de biossecagem foi desenvolvido como uma alternativa de baixo consumo de energia para recuperar sólidos secos e biologicamente estabilizados de resíduos orgânicos (Jewell e Cunning, 1984). Ela pode ser compreendida como uma etapa intermediária do processo de compostagem. Enquanto a compostagem oxida toda a sua matéria orgânica disponível, a biossecagem consome apenas parte dessa matéria orgânica para a geração de calor, preservando o restante do resíduo.

Segundo os autores, biossecagem é um processo de digestão e secagem aeróbica em dois estágios, que combina alta taxa de digestão aeróbica termofílica e secagem com baixo consumo de energia. O gerenciamento eficiente do substrato, água, energia e ar – tanto para uso microbiano quanto para secagem – resulta em uma quantidade determinada de oxidação da matéria orgânica por bactérias termofílicas. A reação exotérmica de oxidação do substrato fornece energia para elevar a temperatura do reator a condições termofílicas (maiores que 43°C) aquecendo o ar de secagem e diminuindo a necessidade de fontes externas de energia para essa finalidade. Frei et al. (2004) estudaram o que foi por eles chamado de novo modelo de

secagem utilizando aeração forçada através de uma matriz porosa de biomassa constituída de resíduos da indústria de papel. Para os autores o processo de biossecagem tende a oferecer uma série de vantagens econômicas, como:

- economia de combustível devido ao aumento do valor calorífico do material seco, incluindo uma redução no combustível suplementar (tipicamente gás natural e / ou óleo) para a caldeira;
- redução ou mesmo eliminação da exigência de aterro;
- redução nas emissões de gases de efeito estufa se a combustão de biomassa for considerada zero para emissões de CO₂;
- economia energética devido ao baixo consumo da operação;

As pesquisas nessa área também indicam que a tecnologia atual na construção, operação e aumento de escala necessita ser aprimorada. Muitos autores relatam problemas na operação de biossecadores utilizando a configuração de leitos fixos. Porém, os mesmos autores reforçam que, dessa forma, muito sobre a natureza do resíduo e a relação entre energia, temperatura, velocidade do ar de secagem e umidade final podem ser conhecidos, antes de evoluir para um estudo mais aprofundado dos equipamentos onde esse tipo de secagem pode ser realizado, bem como a operação em regime permanente.

Biossecagem

A imagem do equipamento para biossecagem está disponível na Figura 2(a). O corpo do biossecador foi construído em PVC em três partes, a base, o cilindro central e o topo. A lateral do secador foi revestida com manta cerâmica para isolamento térmico. O cilindro central possui 30 cm de diâmetro e 62 cm de altura.

Para o sistema de aquisição de temperatura no plano central do equipamento foram instaladas cinco tomadas de temperatura igualmente espaçadas ao longo da altura permitindo a subdivisão do leito em cinco partes quando necessário.

A separação dos leitos pode ser feita utilizando o conjunto de placas separadoras conforme ilustrado na Figura 2 (b). O cilindro central é separado da base por uma placa perfurada que serve como suporte e

distribuidor do ar de secagem simultaneamente.

A aquisição de temperatura foi realizada por sensores de temperatura Ds18b20 compatível com a plataforma Arduino com precisão de $\pm 0,5^{\circ}\text{C}$. A queda de pressão ao longo do leito durante a operação e biossecagem foi determinada por um sensor de pressão Mpx5010dp, também compatível com a plataforma Arduino.



Figura 2: (a) corpo do biossecador; (b) placas separadoras.

O controle de vazão de ar foi feito através da regulagem de um rotâmetro calibrado da marca Indflow, conforme observado na figura 3 (a). O sistema de aquisição de massa foi feito com três células de carga com capacidade para 20 kg com placas de aquisição Hx711, com precisão de 5g, conforme a figura 3 (b).

O software SuperSys Drying foi especialmente desenvolvido para a aquisição de dados online de temperatura, pressão e carga, além de permitir a incorporação de sensores de CO₂, O₂ e umidade. A massa seca foi obtida mantendo-se as sementes em estufa com circulação de ar, da marca Technal, a uma temperatura de $105 \pm 3^{\circ}\text{C}$ por 24 horas. Ao final da secagem em estufa a amostra foi pesada com o auxílio de uma balança digital de precisão 0,001 g da marca Gehaka.

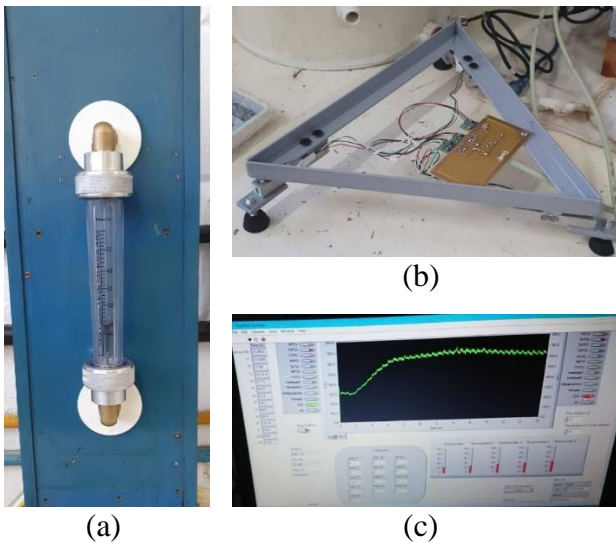


Figura 3: a) rotâmetro Indflow, (b) suporte para aquisição de massa, (c) software SuperSys Drying para aquisição de dados de temperatura, pressão e massa.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

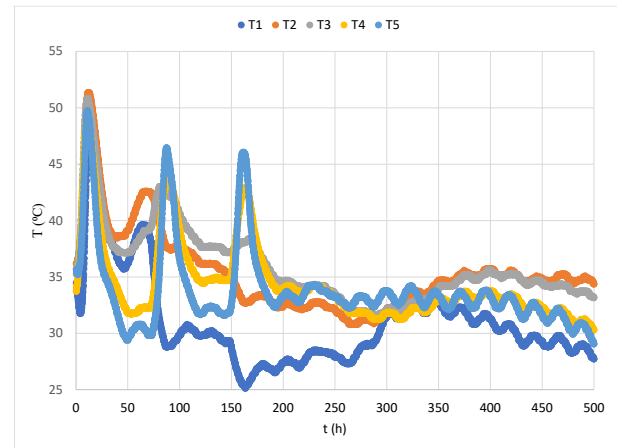
Biossecagem com carga total

Considerando que grande parte da bibliografia utiliza a configuração de leito espesso com profundidades superiores a 1 m como alvo de estudo, a exploração da biossecagem teve início utilizando todo o volume do sistema com carga máxima, avaliando-se a temperatura ao longo da altura do leito de 10 em 10 cm. O sistema foi carregado com 20 kg de resíduo com umidade inicial de 80 % b.u disposto em um leito fixo não compartimentado.

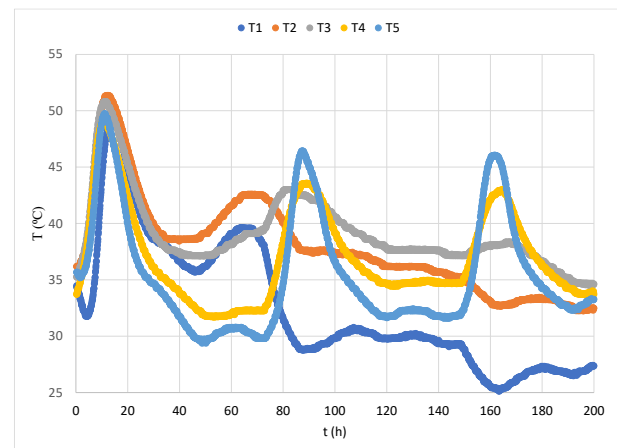
Fixou-se arbitrariamente uma vazão de ar de $0,2 \text{ m}^3/\text{h}$ a fim de se avaliar o comportamento do sistema para vazões significativamente baixas de ar. Nas dimensões do sistema, vazões inferiores a $0,2 \text{ m}^3/\text{h}$ poderiam comprometer severamente o fornecimento de oxigênio para o sistema, promovendo a formação de zonas anaeróbias (Scaglia et al.; 2000).

O sistema operou por um período de 500 horas de forma a reproduzir os elevados tempos de operação encontrados na literatura (Adani et al., 2001; Adani et al., 2004; Bilgin e Tulun, 2015; González et al., 2019; Rada et al., 2007; Rada et al, 2010; Sugni et al, 2005; Tom et al., 2016). A Figura 3 apresenta a variação de temperatura no plano central para cinco posições ascendentes ao longo do leito.

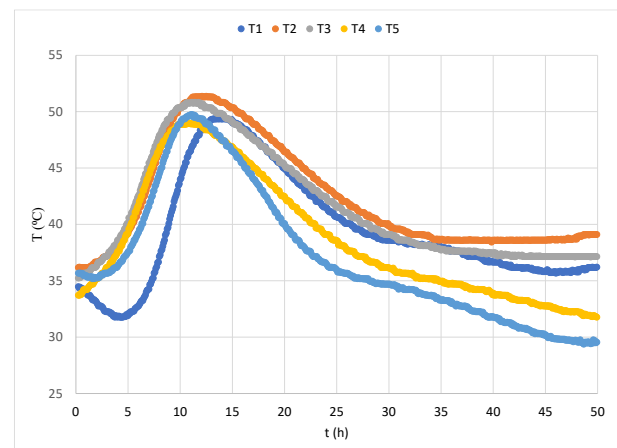
Os gráficos ilustram o tempo total de operação (a) com destaques para os intervalos de tempo de 200h (b) e 50h (c).



(a)



(b)



(c)

Figura 4: Variação da temperatura no plano central para $t = 500\text{h}$ (a); com destaques para $t = 200\text{h}$ (b); $t = 50\text{h}$ (c), $Q = 0,2 \text{ m}^3/\text{h}$, $m = 20 \text{ kg}$ de resíduo.

Conforme observado na Figura 4, nas primeiras 12h de operação, todo o sistema atingiu temperaturas ligeiramente superiores a 50 °C partindo de uma temperatura inicial de 35 °C. Esse aumento de temperatura está de acordo com o encontrado na literatura para o início do processo de biossecagem, mostrando que a atividade biológica associada ao fornecimento de oxigênio contribuiu para o aquecimento do sistema. Os destaques na Figura 4 (b) e (c) indicam também que, a partir de $t = 40$ h, as temperaturas na parte inferior do leito (T_1 , T_2 e T_3) apresentaram decréscimo, com ligeira recuperação a partir de $t = 60$ h. Entretanto, o aumento de temperatura para a região do leito distante 35 cm da base foi menos significativo do que no topo, pois o leito apresentou compactação ao longo da operação, comprometendo o fornecimento de oxigênio nas regiões onde a compactação foi mais acentuada. Além disso, a literatura fornece uma grande quantidade de informações sobre a formação de caminhos preferenciais de escoamento em leitos fixos que operam com recheios com características semelhantes ao constituído por resíduos cítricos.

Ao contrário do que alguns trabalhos reportam, a diminuição da atividade biológica nas regiões inferiores do leito não teve relação com o ressecamento provocado pela passagem de ar. Neste experimento, com exceção da camada imediatamente em contato com o suporte do leito, não houve o ressecamento da base do leito. Isso está associado ao fato de que a umidade do sistema variou muito pouco ao longo da operação, tanto pela baixa vazão, incapaz de transportar quantidades significativas de água do sistema, quanto para o processo de oxidação da biomassa, que também produz água.

Da mesma forma, nos setores superiores do leito, onde os efeitos da compactação foram menores e consequentemente a distribuição e oxigênio melhor, houve a formação de dois picos adicionais de temperatura em T_4 e T_5 . Este comportamento está de acordo com o observado na literatura para sistemas onde água foi adicionada para reativar a atividade biológica prejudicada pela secagem. Ainda que o experimento não tenha promovido a adição de água durante o processo, uma quantidade

significativa de água condensou no topo do reator, retornando ao sistema periodicamente num ciclo que se reflete no comportamento térmico das regiões superiores. Podemos inferir, portanto, que o processo de biossecagem é antagônico na sua essência. Ao mesmo tempo que o objetivo primordial é a remoção de água do resíduo, essa mesma remoção prejudica a atividade metabólica responsável pela elevação da temperatura do sistema.

Enquanto o sistema seca, a atividade metabólica dos microrganismos responsáveis pela degradação da matéria orgânica diminui, com consequente diminuição da temperatura e menor potencial para remoção da umidade. Esse comportamento antagônico evidencia a necessidade de estudos mais aprofundados sobre as melhores configurações operacionais, que promovam a maior manutenção possível da atividade metabólica em associação com a maior remoção de água. Essa análise necessariamente passa pela adoção de melhores configurações do leito, com garantia de melhor fornecimento de oxigênio, melhor percolação do ar de secagem, com consequente melhoria nos mecanismos de transferência de calor e massa. Apesar da temperatura alcançada no início da operação, e dos picos subsequentes de temperatura nas regiões superiores do leito, a remoção de água do sistema e sua consequente secagem foi considerada insatisfatória para efeitos práticos. O gráfico da Figura 5 indica a perda total de massa ao longo da operação, com valor máximo de aproximadamente 2,5 kg.

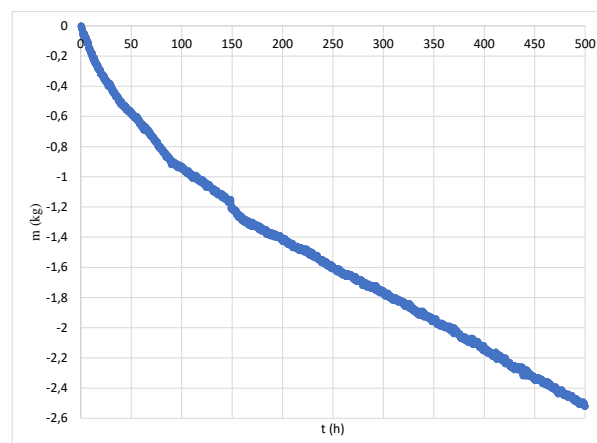


Figura 5: Perda de massa total durante o processo de biossecagem, $Q = 0,2 \text{ m}^3/\text{h}$, $m = 20 \text{ kg}$ de resíduo.

O mesmo procedimento foi replicado, mas com uma vazão de $4,0 \text{ m}^3/\text{h}$ a fim de garantir um suprimento adequado de oxigênio para a ativação dos processos biológicos e avaliar a formação de picos de temperatura. A variação de temperatura em cada região do leito pode ser observada no gráfico da Figura 6.

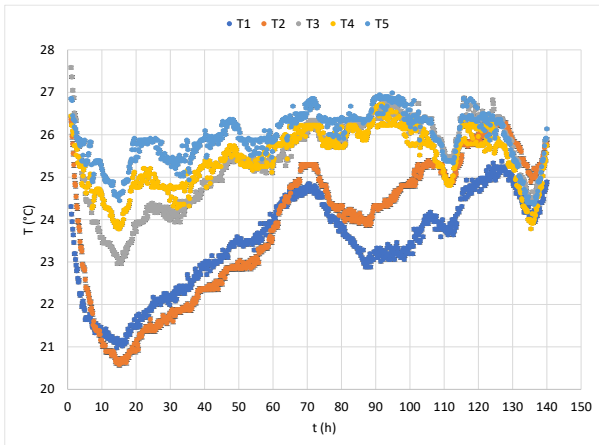


Figura 6: Variação da temperatura no plano central, $Q = 4,0 \text{ m}^3/\text{h}$, $m = 20 \text{ kg}$ de resíduo.

Ao longo das 140h de operação foi possível observar que o processo de biossecagem não ocorreu em nenhuma seção do leito, razão pela qual o experimento foi interrompido. Uma série de fatores contribuiu para o colapso do processo nas condições estudadas.

Inicialmente, considerando a elevada umidade da amostra, foi observada uma queda significativa da temperatura nas seções inferiores do leito (T_1 e T_2) nas primeiras 24h de operação. Isso ocorreu devido ao resfriamento evaporativo provocado pela passagem de ar nessas regiões. A partir das regiões iniciais, com o aumento da umidade do ar na medida em que percola o leito, o efeito do resfriamento evaporativo diminui nas seções T_3 , T_4 e T_5 .

Constitui um desafio ao processo de biossecagem estabelecer uma vazão tal que promova o crescimento microbiano sem a promoção e um resfriamento evaporativo, que pode gerar no leito temperaturas suficientemente baixas a ponto de inibir a atividade microbiológica do sistema.

O gráfico da Figura 7 indica a perda total de massa ao longo da operação, com valor máximo de aproximadamente $4,3 \text{ kg}$.

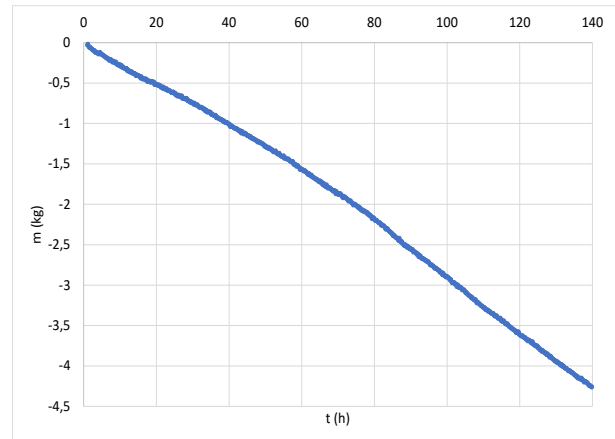


Figura 7: Perda de massa total durante o processo de biossecagem, $Q = 4,0 \text{ m}^3/\text{h}$, $m = 20 \text{ kg}$ de resíduo.

Ainda que o sistema não tenha apresentado a curva de elevação térmica típica de um processo de biossecagem, devido à alta vazão a remoção de água do sistema foi significativamente superior àquela observada na operação com $Q = 0,2 \text{ m}^3/\text{h}$. Nestas condições a secagem foi totalmente convectiva. Outra característica notável nesse tipo de operação, foi a significativa secagem da região inicial do leito (T_1) e a formação de caminhos preferenciais de escoamento, que tornaram a distribuição de oxigênio prejudicada nas regiões próximas ao eixo central do equipamento.

Ao término da operação, ainda com umidade elevada, o leito apresentou o desenvolvimento de fungos nas regiões de maior umidade além de odor característico de processos fermentativos provocados pela má distribuição de oxigênio no sistema.

Biossecagem com carga parcial

Levando em conta que as operações envolvendo o leito completamente preenchido revelaram uma forte desestruturação do leito e a formação de caminhos preferenciais de escoamento, foram realizados ensaios preliminares utilizando separadores igualmente espaçados conforme ilustrado na Figura 2(b). Entretanto, ensaios com a carga total para esse sistema não mostraram qualquer melhoria na elevação de temperatura e nem na remoção de água do sistema, apesar da nítida melhora na distribuição de ar no leito e maior

uniformidade de secagem entre as camadas do sistema.

Por conta disso, foi explorada uma configuração do sistema que utilizou apenas a região inferior do biossecador, dispondo de 4,0 kg de resíduo. O sistema operou por um período de 50h com duas vazões, $Q = 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$. A evolução da temperatura do sistema ao longo do tempo para ambas as vazões pode ser observada no gráfico da Figura 8.

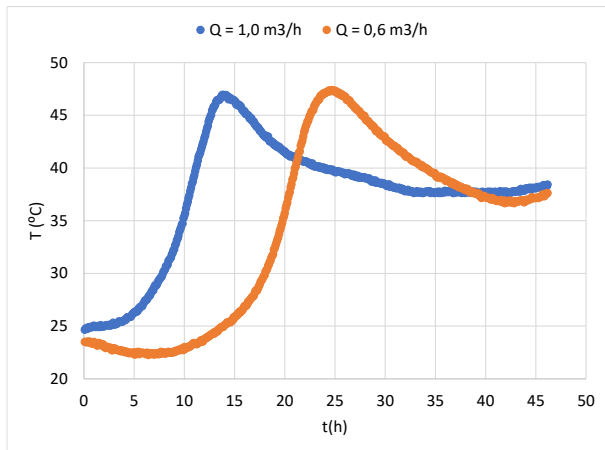


Figura 8: Variação da temperatura no plano central, $Q = 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $m = 4,0 \text{ kg}$ de resíduo.

As duas operações apresentaram pico de temperatura próximos a $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Para a vazão de $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ o tempo para o sistema atingir o pico de temperatura foi de aproximadamente 12h, enquanto que para a vazão de $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$ o tempo foi de 25h.

Ainda que a temperatura tenha sido inferior à observada na biossecagem com carga total, a operação com uma massa cinco vezes menor apresentou algumas vantagens. Entre elas podemos citar a menor compactação do leito, maior uniformidade do escoamento do ar que percola o sistema, menor formação de zonas anaeróbias e menor formação de caminhos preferenciais. Além disso, a menor quantidade de água presente no sistema pode ser transportada com maior facilidade pela passagem de vazões relativamente baixas de ar, muito embora elas fossem superiores às empregadas na configuração com carga total.

A Figura 9 apresenta a perda de água do sistema para ambas as vazões estudadas nessa configuração. Foi possível observar que proporcionalmente à massa do sistema, a

configuração com carga parcial apresentou maior perda de massa. Em ambos os casos a massa total removida foi de aproximadamente 0,8 kg de água. Proporcionalmente, a operação com carga total removeu 0,125 kg de água/kg de leito, enquanto a operação com carga parcial removeu 0,2 kg de água/kg de leito com um tempo de operação dez vezes menor.

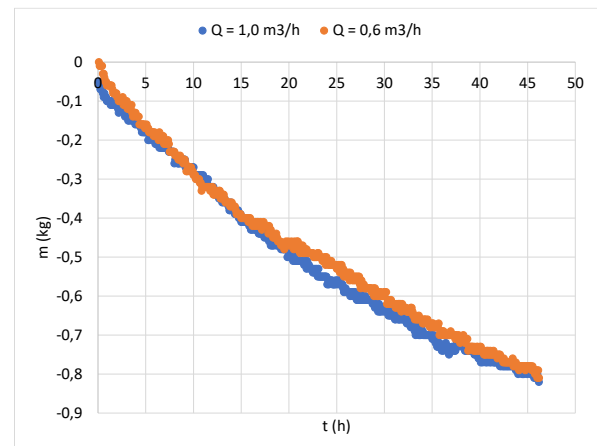


Figura 9: Perda de massa total durante o processo de biossecagem, $Q = 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$, $m = 4,0 \text{ kg}$ de resíduo.

Cabe ressaltar que a perda de água foi bastante similar nos dois sistemas, independentemente de qual deles atingiu primeiro a temperatura máxima de biossecagem. Isso acontece pois, apesar do pico de temperatura para a operação com uma vazão de $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ tenha acontecido nas primeiras 12h, ambos os sistemas atingiram o mesmo nível de temperatura.

Essa operação sugere que processos de biossecagem não necessitam obrigatoriamente de tempos de operação de vários dias, conforme fartamente documentado na literatura (Adani et al., 2001; Adani et al., 2004; Bilgin e Tulun, 2015; González et al., 2019; Rada et al., 2007; Rada et al., 2010; Sugni et al., 2005; Tom et al., 2016). Do ponto de vista técnico, operações de secagem que ocorrem em temperaturas baixas são notadamente ineficientes, o que sugere que os biossecadores podem operar de maneira mais eficiente apenas durante os picos de temperatura.

Os estudos disponíveis descrevem operações de biossecagem para diversos tipos de resíduo, muitas das vezes operando muito

além da formação do pico de temperatura, apenas em modo de secagem convectiva.

Outro ponto a ser destacado foi a configuração e leito fixo. Dada a natureza dos resíduos orgânicos, submetê-los à uma operação vertical em batelada pode ser desafiador e até mesmo desaconselhável. Isto porque os leitos constituídos por esse tipo de material tendem a apresentar compactações dos mais diferentes níveis, levando à formação de caminhos preferenciais, criação de zonas anaeróbias com conseqüente colapso da biossecagem.

Porém, mesmo a operação em leito fixo pode ser sistematicamente melhorada pela adoção de secagem intermitente, onde a biossecagem a baixas vazões seria submetida a pulsos periódicos de ar. Se por um lado as baixas vazões contribuem para o aumento da temperatura, elas também inviabilizam o transporte de massa eficiente no leito. Ao considerarmos a capacidade do sistema de promover picos de temperatura sucessivos, desde que a umidade interna do leito possa ser uniformizada, uma alternativa para a melhoria do processo consiste em homogeneizar o leito ao fim de cada ciclo de intermitência. Isso permitiria uma operação com maior temperatura média e os pulsos de ar promoveriam uma maior oxigenação do sistema, diminuindo a formação de zonas anaeróbias. Dessa forma, foi realizado o estudo da operação intermitente entre biossecagem e secagem convectiva, por um período fixo com dois ciclos de intermitência, a fim de se avaliar a possível melhora na remoção de água do sistema.

Biossecagem intermitente

Para a operação intermitente, as condições adotadas foram biossecagem com vazões de $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ e $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$ por um período de 12h seguido de secagem convectiva com uma vazão de $4,0 \text{ m}^3/\text{h}$ por um período de 12h. Após esse período o sistema foi aberto, o leito foi homogeneizado e o sistema iniciou novo ciclo de biossecagem seguido por secagem convectiva.

O gráfico da Figura 10 ilustra a operação para as vazões de biossecagem de $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ (linha em azul) e $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$ (linha em laranja) com um tempo total de operação de 48h.

O gráfico da Figura 11 ilustra a perda de massa para as duas operações.

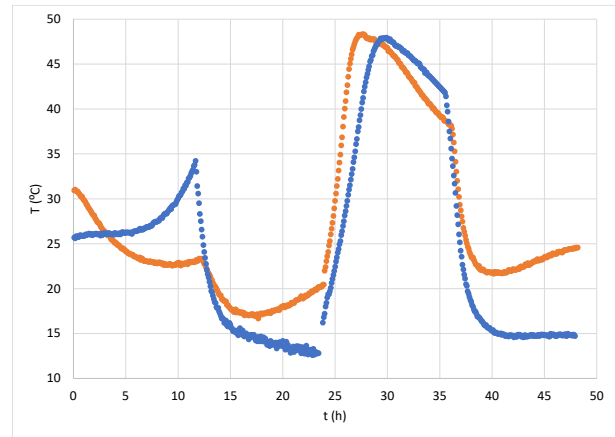


Figura 10: Variação da temperatura no plano central, $Q = 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ (azul) e $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$ (laranja), $m = 4,0 \text{ kg}$ de resíduo com dois ciclos de intermitência.

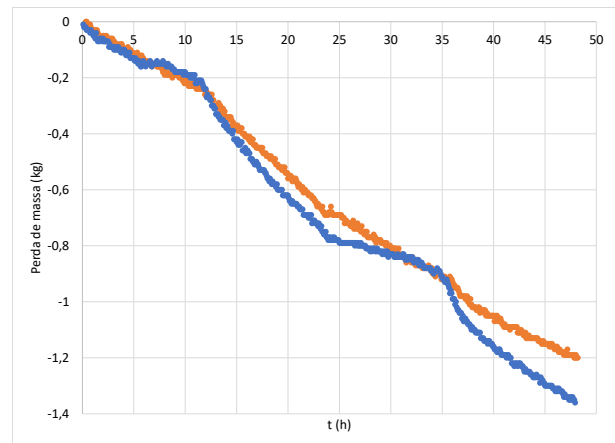


Figura 11: Perda de massa total durante o processo de biossecagem, $Q = 1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ (azul) e $0,6 \text{ m}^3/\text{h}$ (laranja), $m = 4,0 \text{ kg}$ de resíduo com dois ciclos de intermitência.

Para a operação com uma vazão de $1,0 \text{ m}^3/\text{h}$ foi possível observar um aumento de aproximadamente $10 \text{ }^\circ\text{C}$ na temperatura, nas primeiras 12 horas do processo de biossecagem. Na sequência, a secagem convectiva associada ao resfriamento evaporativo diminuiu significativamente a temperatura do leito de quase $35 \text{ }^\circ\text{C}$ para aproximadamente $12 \text{ }^\circ\text{C}$. Isso mostra que a etapa convectiva necessita ser melhor explorada e analisada a fim de se evitar efeitos adversos de resfriamento evaporativo.

Considerando que bactérias termofílicas operam em temperaturas superiores a $40 \text{ }^\circ\text{C}$, uma redução de temperatura do leito dessa magnitude pode provocar a inibição desses

microrganismos com conseqüente colapso no processo de biossecagem. Vale destacar que as condições operacionais impostas à primeira etapa de biossecagem foram idênticas às utilizadas para a obtenção das curvas no gráfico da Figura 8. Naquelas condições, o aumento de temperatura inicial atingiu um pico de temperatura próximo a 47 °C em aproximadamente 12 h, enquanto que na Figura 11, no mesmo intervalo de tempo, o sistema atingiu uma temperatura de 35 °C.

Isso pode ser explicado devido à natureza do resíduo. Diferentemente dos resíduos sólidos urbanos onde a variedade de microrganismos é grande, os resíduos cítricos produzidos durante a fabricação de suco de laranja são assépticos. Devido aos protocolos de higiene industrial exigidos em fabricações desse tipo, a presença de microrganismos capazes de atuar na oxidação da matéria orgânica é menor e, eventualmente, não constituem número suficiente para dar início ao processo de biossecagem, com conseqüente aumento de temperatura.

Assim, a reprodutibilidade do processo fica comprometida pois não há garantias de que as diferentes amostras de resíduo apresentem carga microbiológica similar. Isso fica evidente quando observamos o comportamento da etapa inicial de biossecagem para a vazão de 0,6 m³/h na operação intermitente. Ainda que as condições sejam idênticas às adotadas para a operação ilustrada na Figura 8, aqui o sistema não apresenta aumento de temperatura. Ao contrário, ela diminui de aproximadamente 32 °C para 23 °C. Vale ressaltar que a temperatura do ar de entrada para todos os experimentos sempre esteve dentro do mesmo limite, o que exclui como causa desse comportamento a oscilação da temperatura ambiente. Considerando períodos de noite e dia, a temperatura do ar de entrada oscilou entre 22 °C e 28 °C para todos os processos analisados no presente estudo.

Uma alternativa promissora para a padronização dos microrganismos nas etapas iniciais da biossecagem seria a coparticipação de outros resíduos que possuam carga microbiológica abundante. Alguns exemplos de resíduos dessa natureza são a cama de aves, resíduos sólidos urbanos, e lodos ativados.

Um efeito observado em ambas as operações intermitentes foi a rápida elevação e temperatura após o término do primeiro ciclo. Em ambos os casos a temperatura do sistema atingiu valores próximos a 47 °C, mesmo partindo de temperaturas baixas. Isso pode indicar que a homogeneização do leito permitiu uma melhora na distribuição de umidade com conseqüente ganho de atividade biológica. Além disso, a elevada taxa de aeração também pode ter contribuído para um melhor desenvolvimento dos microrganismos nessa etapa em particular.

Após 48h de operação, o sistema apresentou perda de água de 1,2 kg e 1,4 kg respectivamente para os sistemas operando com vazões de ar na fase de biossecagem de 0,6 e 1,0 m³/h. Considerando que a massa inicial do sistema foi de 4,0 kg com uma umidade inicial de 80% b.u., podemos considerar que a intermitência promoveu a maior remoção de água por carga inicial de resíduo dentre todos os modos de operação avaliados. Esse resultado está de acordo com o esperado, uma vez que o sistema atingiu temperaturas próximas de 47 °C associado a uma melhora no transporte de massa devido às etapas convectivas.

Ainda que aqui estejam apresentados resultados promissores sobre a biossecagem de resíduos cítricos, é importante destacar que além destes ensaios, outros resultaram em um completo colapso do sistema de biossecagem devido ao resfriamento evaporativo nas etapas iniciais. Os dados relativos a estes experimentos não estão apresentados no presente estudo pois configuram unicamente tentativas infrutíferas de promover a secagem do meio. O que se pode concluir sobre estes experimentos em particular é que, apesar das etapas convectivas dos ciclos de intermitência promoverem uma considerável melhoria nos mecanismos de transferência de massa do sistema, seja na remoção de água ou no fornecimento de oxigênio para o meio, há necessidade de um estudo mais apurado sobre os limites de vazão que podem ser aplicados nessa fase que impeçam o resfriamento do leito com conseqüente colapso do processo de biossecagem.

Em face de tudo o que foi discutido, podemos concluir que o processo de

biossecagem de resíduos cítricos tende a ser promissor, muito embora estudos mais aprofundados sejam necessários para compreender melhor o complexo funcionamento desse tipo de operação.

Como sugestões para trabalhos futuros, destacamos o estudo da padronização da carga microbiológica, a avaliação pormenorizada do efeito da etapa convectiva da intermitência no resfriamento e/ou eventual colapso do processo, avaliação da coparticipação de outros resíduos a fim de contribuir para a melhora no fornecimento de nutrientes com vistas ao aumento da temperatura máxima de operação do sistema, a aplicação de modelos de transferência de calor para a obtenção de parâmetros operacionais fundamentais para o processo de secagem, melhoria nas configurações do leito fixo e estudo de equipamentos que promovam a movimentação suave do leito, visando a operação contínua do biossecador.

NOMENCLATURA

m: massa (kg)

Q: vazão volumétrica de ar (m^3/h)

T: temperatura ($^{\circ}C$)

t : tempo (h)

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Sucocítrico Cutrale Ltda pelo fornecimento do resíduo orgânico utilizado no presente estudo.

REFERÊNCIAS

ABECITRUS (2008), História da Laranja e Subprodutos da Laranja. Available from: www.abecitrus.com.br/.

ADANI, F.; BAIDO, D.; CALCATERRA, E.; GENEVINI, P. (2002), The influence of biomass temperature on biostabilization–biodrying of municipal solid waste. *Bioresource Technology*, n.83, p.173–179.

ADANI, F.; TAMBONE, F.; GOTTI, A. (2004), Biostabilization of municipal solid waste. *Waste Management*, v.24, p.775–783.

BILGIN, M.; TULUN, S. (2015), Biodrying for municipal solid waste: volume and weight reduction. *Environmental Technology*, v.36, n.13, 1691–1697.

FREI, K. M.; CAMERON, D.; STUART, P. R. (2004), Novel Drying Process Using Forced Aeration Through a Porous Biomass Matrix. *Drying Technology*, v.22, n.5, p.1191–1215.

GONZÁLEZ, D.; GUERRA, N.; COLÓN, J.; GABRIEL, D.; PONSÁ, S. (2019), Filling in sewage sludge biodrying gaps: Greenhouse gases, volatile organic compounds and odour emissions. *Bioresource Technology*, v.291, p.1-8.

JEWELL, W. J.; CUMMINGS, R. J. (1984), Apple Pomace Energy and Solids Recovery. *Journal of Food Science*, v.49, n.2, p. 407–410.

LIMA, V. F.; ARAÚJO, L. F.; AGUIAR, E.; M.; COELHO, R. R. P. (2017), Processos biotecnológicos aplicados ao bagaço de laranja para redução dos custos na alimentação animal. *Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial*, v.11, n.2, p. 2466-2483.

MORAES, J. C.; CRESTANI, C. E. (2018), Caracterização Química do Bagaço de Laranja. *Blucher Chemical Engineering Proceedings*, v.1, n.5, p. 257-260.

NAVAEE-ARDEH, S.; BERTRAND, F.; STUART, P. R. (2006), Emerging Biodrying Technology for the Drying of Pulp and Paper Mixed Sludges. *Drying Technology*, v.24, p.863–878.

RADA, E. C.; FRANZINELLI, A.; TAISS, M.; RAGAZZI, M.; PANAITESCU, V.; APOSTOL, T. (2007), Lower Heating Value Dynamics During Municipal Solid Waste Bio-Drying. *Environmental Technology*, v.28, p.463-469.

RADA, E. C.; VENTURI, M.; RAGAZZI, M.; APOSTOL, T.; MARCULESCU, C. (2010), Bio-Drying Role in Changeable Scenarios of Romanian MSW Management. *Waste Biomass Valor*, v.1, p.271–279.

REZZADORI, K.; BENEDETTI, S. (2009), Proposições para Valorização de Resíduos do Processamento do Suco de Laranja. *Anais do 2nd International*

- Workshop Advances in Cleaner Production, São Paulo – Brasil, p.1-11.
- RIVAS, B.; TORRADO, A.; TORRES, P.; CONVENTI, A.; DOMINGUÉZ, J. M. (2008), Submerged Citric Acid Fermentation on Orange Peel Autohydrolysate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v.56, n.7, p.2380-2387.
- SCAGLIA, B.; TAMBONE, F.; GENEVINI, P. L.; ADANI, F. (2000), Respiration Index Determination: Dynamic and Static Approaches. *Compost Science & Utilization*, v.8, n.2, p.90-98.
- SUGNI, M.; CALCATERRA, E.; ADANI, F. (2005), Biostabilization–biodrying of Municipal Solid Waste by Inverting Air-flow. *Bioresource Technology*, n.96, p.1331–1337.
- TOM, A. P.; PAWELS, R.; HARIDAS, A. (2016), Biodrying Process: A Sustainable Technology for Treatment of Municipal Solid Waste with High Moisture Content. *Waste Management*, v.49, p.64-72.
- WRIGHT, P. (2000) Biodrying Manure on a Dairy Farm. *Annals of Animal Residuals Management Conference Water Environment Federation, Kansas City, Missouri*, p.1-16.