

III-012 - CO-DIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS DE HORTIFRUTIGRANJEIROS E FRAÇÃO ORGÂNICA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

Luis Alcides Schiavo Miranda ⁽¹⁾

Químico Industrial - Dr. em Ciências (UFRGS), Pós-Dr. Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (IPH/UFRGS). Prof. Ass. II - PPGE/UNISINOS.

Luís Eduardo Krämer ⁽²⁾

Engenheiro Civil pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). Mestrando do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UNISINOS.

Paula Sabrina Mallmann ⁽³⁾

Engenheira Ambiental pela Universidade de Santa Cruz do Sul (UNISC). Mestranda do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UNISINOS.

Luciana Paulo Gomes ⁽⁴⁾

Engenheira Civil pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS), Mestre e Doutora em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Universidade de São Paulo (USP). Professora titular da Universidade do Vale do Rio dos Sinos onde foi Coordenadora do Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil e Coordenadora do Sistema de Gestão Ambiental e de Qualidade dos Laboratórios Tecnológicos.

Marcelo Oliveira Caetano ⁽⁵⁾

Engenheiro Civil pela Universidade do Vale do Rio dos Sinos (UNISINOS). Mestre pelo Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil da UNISINOS. Doutorado em Engenharia de Minas, Metalurgia e Materiais (UFRGS). Professor do Curso de Pós Graduação em Engenharia de Segurança do Trabalho. Professor e Coordenador do Curso de Pós Graduação em Engenharia de Saneamento. Professor dos cursos de graduação em Engenharia Civil, Engenharia Ambiental e Gestão Ambiental na UNISINOS.

Endereço ⁽¹⁾: Av. Unisinos, 950. CEP 93022-000 - São Leopoldo - RS - Brasil. Tel / Fax: (55 51) 3590 8464. E-mail: lalcides@unisinos.br

RESUMO

A digestão anaeróbia (DA) de resíduos orgânicos, tais como a fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) e dos resíduos de hortifrutigranjeiros (RHF) é duplamente vantajosa, pois além de produzir biogás permite diminuir o volume de resíduos orgânicos dispostos em aterros sanitários. A co-digestão da FORSU com o RHF é uma alternativa para melhorar a eficiência do processo de DA, tendo em vista uma potencialização da produção de biogás (KHALID et al., 2011). Substâncias orgânicas presentes em determinado resíduo podem ser mais facilmente digeridas quando consorciadas com outros resíduos (MATA-ALVAREZ et al., 2014). Identificamos qual a proporção ótima que permite uma operação estável do reator com a maximização da produção de biogás. Foram realizadas quatro bateladas em escala de bancada com relação substrato:inóculo (S:I) fixa em 1:1 em termos de STV, ou seja, todas as bateladas tiveram a mesma quantidade de STV adicionados independentemente da quantidade de cada resíduo utilizado como substrato. A batelada 1 utilizou como substrato apenas a FORSU e a batelada 4 apenas o RHF, já a batelada 2 teve 50% da FORSU e 50% de RHF e a batelada 3 com 25% da FORSU e 75% de RHF. O monitoramento do processo foi realizado através dos parâmetros de sólidos totais, sólidos totais voláteis, temperatura, pH, alcalinidade/acidez, ácidos orgânicos voláteis, carbono orgânico total, fósforo, nitrogênio total e nitrogênio amoniacal, além da análise quantitativa e qualitativa do biogás. Os maiores volumes acumulados de biogás foram encontrados nas bateladas 2 e 3, às quais digeriram dois resíduos simultaneamente, caracterizando a co-digestão anaeróbia. A batelada 3 apresentou a maior produção média de biogás acumulado com 26,67NL e o melhor rendimento médio de metano com 0,40Nm³CH₄/kgSTV.

PALAVRAS-CHAVE: Biogás, digestão anaeróbia, FORSU, RHF.

INTRODUÇÃO

Processos anaeróbios são bem conceituados mundialmente. A rápida capacidade de degradação da matéria orgânica e consequentemente o menor espaço necessário às instalações de um sistema de digestão anaeróbia (DA), bem como as possibilidades de ganhos energéticos com o biogás, fazem com que este processo se torne atrativo em determinadas situações (CHERNICHARO, 2007).

A DA é um processo a ser considerado no tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU), pois pode vir a proporcionar um balanço energético positivo com a obtenção do biogás, o qual pode ser queimado em função da grande quantidade de metano presente, além da possibilidade de utilização do digestato como fertilizante orgânico (SCHULZ, 2015; GE et al., 2014).

Os números referentes à geração de RSU em 2017 revelam um total anual de 78,4 milhões de toneladas no país (ABRELPE, 2018). A fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (FORSU) correspondem a mais de 50% do total de RSU gerados no Brasil (BRASIL, 2011). Ademais, resíduos de hortifrutigranjeiros (RHF) são gerados durante a produção, transporte e varejo, além do próprio consumidor final (NAÇÕES UNIDAS, 2016). Do total desperdiçado pelo comércio varejista de supermercados, 6,09% representa o setor de frutas, verduras e vegetais (ABRAS, 2016). Centrais de distribuição como as CEASA também são responsáveis por grandes volumes de RHF.

No tocante à disposição final, cerca de 42,3 milhões de toneladas de RSU, ou 59,1% do coletado, são dispostos em aterros sanitários. O restante (40,9%) dos resíduos coletados, foram despejados em locais inadequados por 3.352 municípios brasileiros, totalizando mais 29 milhões de toneladas de resíduos em lixões ou aterros controlados, que não possuem o conjunto de sistemas e medidas necessários para proteção do meio ambiente e da saúde (ABRELPE, 2018).

Todos os inúmeros aspectos ambientais que implicam na não disposição ou na redução dos resíduos diretamente dispostos em aterros sanitários ou mesmo em lixões ou aterros controlados, corroboram para aumentar o interesse sobre a DA. O tratamento desses resíduos, somada ao ganho energético através da produção de biogás, torna o emprego de matrizes renováveis, como a DA atrativa, inclusive economicamente (BRONZATTI; NETO, 2008).

A co-digestão da FORSU com o RHF é uma alternativa para melhorar a eficiência do processo de DA, tendo em vista uma potencialização da produção de biogás. (KHALID *et al.*, 2011). Substâncias orgânicas presentes em determinado resíduo podem ser mais facilmente digeridas quando consorciadas com outros resíduos. (MATA-ALVAREZ *et al.*, 2014).

Diante da disponibilidade da FORSU e do RHF, tidos como um problema por seus produtores, almeja-se co-digerir os dois resíduos, estabilizando-os e agregando valor ao sistema de tratamento, através do biogás produzido durante o processo. Para mais, este trabalho identifica qual a proporção ótima entre a FORSU e RHF que permita uma operação estável do reator com a maximização da produção de biogás.

OBJETIVO GERAL

Avaliar a produção de biogás a partir da co-digestão anaeróbia da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (FORSU) e resíduos de hortifrutigranjeiros (RHF), utilizando lodo anaeróbio como inóculo.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Avaliar as características da FORSU e do RHF e o potencial de utilização destes resíduos em co-digestão;

Avaliar a produção de biogás utilizando diferentes relações FORSU/RHF;

Avaliar quali-quantitativamente a produção de biogás e a relação com os parâmetros de controle do processo;

Identificar a proporção ótima FORSU/RHF que permite uma operação estável do reator anaeróbico com a máxima produção de biogás.

MATERIAIS E MÉTODOS

A FORSU utilizada neste trabalho foi coletada em uma residência unifamiliar. Resíduos considerados inertes, tais como palitos de dente e guardanapos foram descartados. A composição da FORSU é basicamente de resíduos de alimentos crus e cozidos, como arroz, feijão, massas, carnes, alface, cascas de frutas e verduras, cascas de ovos e pó de café.

Realizou-se uma única coleta com o objetivo de manter a homogeneidade do substrato aplicado a cada batelada. Foi coletada quantidade suficiente para todas as bateladas. Todo o resíduo foi triturado e armazenamento em refrigerador.

O RHF foi coletado em um supermercado. Para evitar sua heterogeneidade, optou-se por realizar a segregação dos componentes aplicados, conforme Tabela 1. O RHF, assim como a FORSU, foi triturado.

Tabela 1 – Proporção de frutas e vegetais presentes no RHF

Frutas (50%)	Vegetais (50%)
Banana (20%)	Repolho (12,5%)
Mamão (20%)	Alface (12,5%)
Maça (10%)	Cebola (12,5%)
-----	Batata (12,5%)

Retirou-se o inóculo de um biodigestor de 282 L, operado com resíduos de restaurante universitário. A coleta foi realizada uma única vez, armazenando o material em tonéis com sistema de sifão para a equalização da pressão. O período de armazenamento mínimo estabelecido foi de 20 dias, evitando assim que um eventual residual de produção de biogás interferisse nos resultados.

Conforme a Figura 1, o sistema experimental foi dividido em quatro bateladas, operadas em bancada e realizadas em triplicata. Os biodigestores consistiam em garrafas de vidro de borossilicato, com volume de 2L. Após a realização da inoculação, os reatores foram selados forçando a passagem do biogás através de um sistema de deslocamento de coluna da água, com o qual determinou-se o volume de biogás produzido. A temperatura mesofílica de 35°C foi mantida através de um banho termostático. Os biodigestores não apresentavam sistema de agitação, no entanto, diariamente, antes da retirada de amostras, realizou-se a agitação manual.



Figura 1 – Sistema operacional

O tempo de retenção de sólidos foi variado, pois cada batelada era dada como encerrada no momento em que constatou-se o cessar da produção de biogás.

As quatro bateladas realizadas, operaram com uma relação substrato/inóculo (S/I) fixa de 1/1, em termos de STV. A relação de substratos aplicados a cada batelada pode ser observada na Tabela 2.

Tabela 2 – Condições de alimentação aplicadas a cada batelada

Batelada	Substrato (%)		Massa de STV (g de STV)				Massa em gramas (g)			
	FORSU	RHF	FORSU	RHF	Inóculo	Total	FORSU	RHF	Inóculo	Total
Batelada 1	100	0	54,04	0	54,04	108,08	281,6	0	1545	1826,6
Batelada 2	50	50	27,02	27,02	54,04	108,08	140,8	143,72	1545	1829,5
Batelada 3	25	75	13,51	40,53	54,04	108,08	70,4	215,58	1545	1831
Batelada 4	0	100	0	54,04	54,04	108,08	0	287,45	1545	1832,5

O monitoramento do processo foi feito através dos parâmetros de sólidos totais (ST), sólidos totais voláteis (STV), temperatura, pH, alcalinidade/acidez, ácidos orgânicos voláteis (AOV), carbono orgânico total (COT), fósforo (P_T), nitrogênio total (N_T) e nitrogênio amoniacal (NH_4^+), além da análise quantitativa e qualitativa do biogás. A caracterização dos dois substratos e do inóculo também utilizou os mesmos métodos, com exceção das análises referentes ao biogás. O fluxograma metodológico apresentado na Figura 2 demonstra de forma simplificada todas as etapas metodológicas aplicadas.

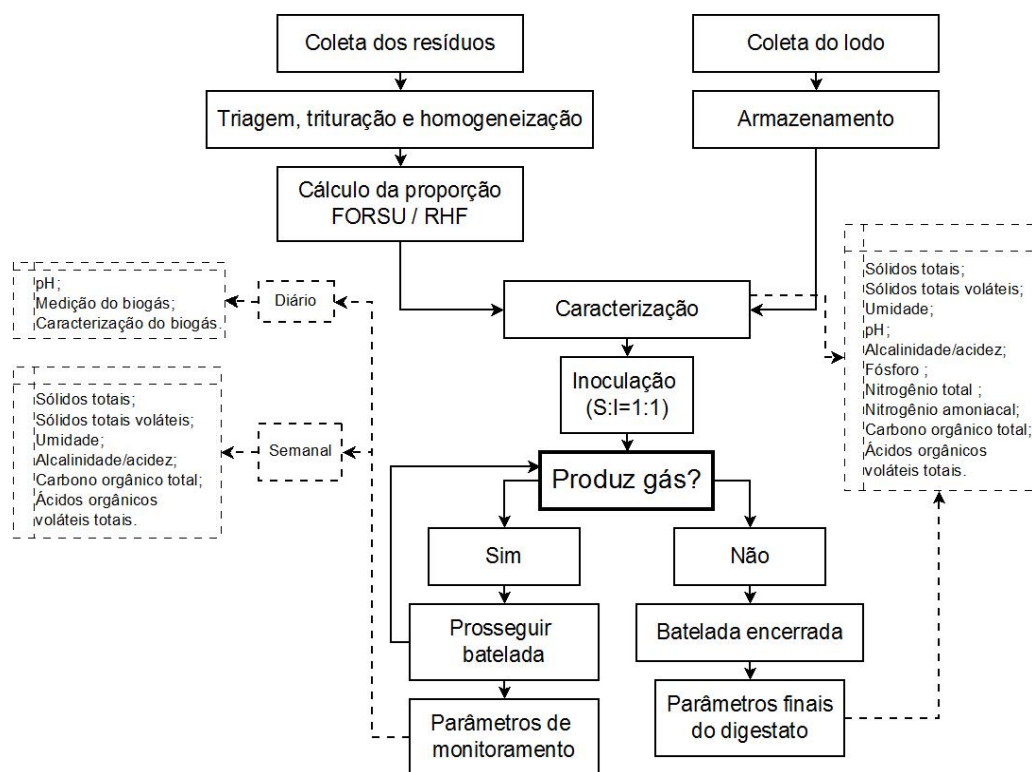


Figura 2 – Fluxograma metodológico

RESULTADOS

CARACTERIZAÇÃO DOS RESÍDUOS E DO INÓCULO

A caracterização completa dos resíduos e do lodo utilizado como inóculo pode ser observada na Tabela 3. O teor de ST e STV encontrados na FORSU são respectivamente de 19,94% e 96,27%ST, os quais se assemelham aos 27,7% e 88,08%ST relatados por Banks et al., (2011). Cabbai et al. (2013), para resíduos alimentares encontrou valores de 30% e 91,80%ST. Já o teor de ST e STV do RHF apresenta valores semelhantes aos encontrados na FORSU, respectivamente com 19,54% e 96,21%, os quais se assemelham aos 8-18% de ST e 86-92%ST de STV, relatados por Bouallagui et al. (2005) em resíduos de frutas e vegetais.

O inóculo utilizado é proveniente de biodigestor em escala piloto, que utiliza como substrato resíduo de restaurante universitário, portanto, com características distintas da maioria dos autores que utilizam inóculo de reatores UASB operados no tratamento de esgoto doméstico. Cabbai et al. (2013) relata valores de ST e STV

de 3,50% e 65,43% ST respectivamente, ou seja, o inóculo utilizado por Cabbai et al. (2013) apresentava menos ST do que os 6,25% encontrados neste trabalho, já os STV são mais semelhantes aos 55,86% mencionados neste estudo.

A umidade de 80,06% e 80,46% respectivamente para a FORSU e o RHF, pode ser observada na Tabela 3. Jaiganesh, Nagarajan e Geetha (2014) encontraram valores médios de umidade de 85% para resíduos vegetais. Já Lin et al. (2011) apresenta uma umidade 92,6% em resíduos de frutas e vegetais e 77,9% em restos alimentares. O lodo utilizado possui uma umidade de 93,74%, valor semelhante aos 87,5% encontrados por Lin et al. (2011).

O pH encontrado para o RHF foi de 4,66 e para a FORSU de 5,90. Ambos os valores são baixos, ainda que não empregada qualquer fruta cítrica como substrato, o que eventualmente ocasionaria a falha do processo pela acidificação do meio. Em contrapartida o pH do inóculo de 8,3, assim como sua capacidade de tamponamento promovida pela alcalinidade e pela grande quantidade de nitrogênio amoniacal evitam que ocorram instabilidades durante o processo de DA.

O valor de N_T encontrado para o RHF foi 904,78 mg.L⁻¹, já Cabbai et al. (2013) encontrou valores 1159 mg.L⁻¹ e 1319 mg.L⁻¹ em resíduo constituído exclusivamente de frutas e legumes recolhidos de supermercados. Di Maria et al. (2015) relata nitrogênio total de 740 mg.L⁻¹ em resíduo exclusivamente de frutas e vegetais. A FORSU apresentou 1168,07 mg.L⁻¹, valor semelhante ao relatado por Cabbai et al. (2013) em resíduos provenientes de restaurante. O lodo apresenta um valor elevado de nitrogênio total, com 5547,36 mg.L⁻¹ o que chega a ser cinco vezes superior ao valores encontrado por Cabbai et al. (2013).

Resíduos de frutas e verduras, bem como resíduos alimentares apresentam baixos valores de nitrogênio amoniacal, o que pode ser confirmado pela caracterização demonstrada na Tabela 3, no entanto, o inóculo utilizado neste experimento apresenta 3000 mg.L⁻¹ de nitrogênio amoniacal. Dependendo das condições de operação e grau de adaptação da biota envolvida no processo, a amônia poderia vir a inibir os microrganismos anaeróbios, contudo, como veremos a seguir não foram notadas quaisquer formas de inibição que ocasionasse a falha do processo de DA.

Tabela 3 - Caracterização dos substratos e inóculo

Parâmetro	Unidade	FORSU	RHF	Lodo
ST	(%)	19,94(0,48)	19,54(0,90)	6,25(0,04)
STV	(%ST)	96,27(0,05)	96,21(0,08)	55,86(0,32)
Umidade	(%)	80,06(0,48)	80,46(0,90)	93,74(0,04)
COT	mg/gST	126,52(5,32)	180,32(12,13)	101,55(3,36)
N_T	mgN _T /L	1168,07(112,33)	904,78(174,49)	5547,36(213,83)
NH_4^+	mgN-NH ₄ ⁺ /L	6,06(0,04)	7,36(0,09)	3096,24(285,11)
P_T	(%ST)	0,056(0,01)	0,180(0,01)	1,44(0,04)
Alcalinidade	mgCaCO ₃ /L	106,67(11,55)	140,00(12,72)	906,67(120,55)
AGV	mgHAcét/L	232,00(36,66)	216,00(41,57)	728,00(36,66)
AOV	mgHAcét/L	384,00(52,00)	235,00(27,00)	960,00(112,00)
pH	-	5,90	4,66	8,3

Média (desvio padrão)

n=3

BATELADA 1

A Figura 3 apresenta a produção acumulada de biogás da batelada 1, composta pelos reatores R1, R2 e R3. O reator R1 apresentou a máxima produção de biogás desta batelada, com total acumulada de 14,39NL. Já o reator R2 teve a menor produção de biogás entre todas as bateladas, com volume total acumulado de 4,19NL. Como o reator R2 apresentou uma produção acumulada de biogás inferior aos demais, poderíamos pressupor que o mesmo havia acidificado, no entanto, os níveis de AGV no momento do cessar da produção de biogás foram de 200 (13,86) mgHAc/L, ou seja, valor semelhante ao encontrado para os demais reatores da mesma batelada e inferiores aos relatados por Lin et al. (2011) quando constatada a acidificação em seu experimental.

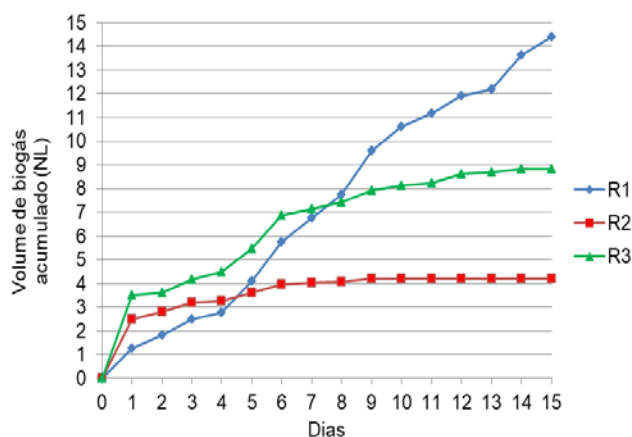


Figura 3 - Volume de biogás acumulado nos reatores da batelada 1

A falha do processo de DA pelo acúmulo de AGV também poderia ser atestado pelo valor de pH ácido, o que não ocorreu, conforme podemos observar na Figura 4. Segundo Cho et al. (2013) a grande concentração de carboidratos e lipídeos presentes em resíduos de origem doméstica, os quais são hidrolisados em glicerol e ácidos graxos de cadeia longa (AGCL) podem ser tóxicos aos microrganismos metanogênicos, contudo, a inibição dos microrganismos metanogênicos teria de ocasionar o acúmulo de AGV.

O TRS encontrado para os reatores R1 e R3 foi de 15 dias e para o reator R2 de 9 dias. Os picos de produção de biogás diários foram encontrados nos dias 9, 1 e 1 respectivamente nos reatores R1, R2 e R3, com o valor máximo obtido no reator R3 de 3,49NL.

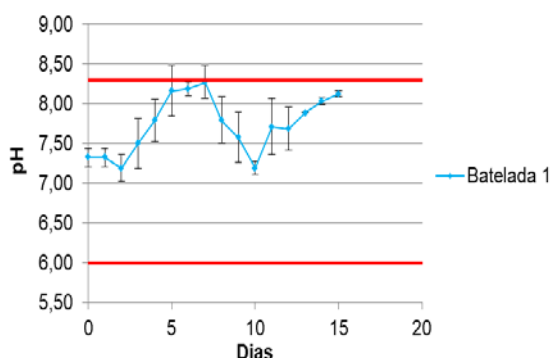


Figura 4 - Evolução do pH para a batelada 1

Os valores de rendimento de metano referentes aos reatores da batelada 1, podem ser observados na Tabela 4. Lin et al. (2011), obteve rendimento de 0,06 Nm³CH₄/kgSTV adicionado, assim como encontrado para o reator R2, porém, este apresenta resultados inferiores aos encontrados para os reatores R1 e R3. Forster-Carneiro et al. (2007) mencionam um rendimento para a DA de resíduos de origem alimentícia de 0,18 Nm³CH₄/kgSTV adicionado, o qual se assemelha em maior grau aos 0,20 e 0,12Nm³CH₄/kgSTV adicionado encontrados respectivamente nos reatores R1 e R3 da batelada 1.

Tabela 4 - Volume acumulado de biogás, porcentagens de metano presentes no biogás, volume acumulado de metano e rendimento da batelada 1

Reator	Volume acumulado de biogás (NL)	Porcentagem de metano no biogás (%)	Volume acumulado de metano (Nml)	Rendimento (Nm ³ CH ₄ /KgSTV)
R1	14,39	75,00(4,68)	10792,50	0,20
R2	4,19	76,88(5,54)	3221,06	0,06
R3	8,83	76,25(8,48)	6732,88	0,12

Média (desvio padrão)

n=3

BATELADA 2

A Figura 5 apresenta a produção acumulada de biogás da batelada 2, com os reatores R4, R5 e R6. Nesta batelada foram aplicados dois substratos em conjunto, ou seja, 50% de RHF e 50% da FORSU. O reator R4 atingiu a produção máxima de biogás da batelada 2, com um total acumulado de 31,41NL, já o menor valor produzido foi encontrado no reator R6 com 18,31NL, o que representa uma variação de produção de 13,10NL. Quaisquer anomalias que pudessem justificar a menor produção de biogás de um dos reatores foram verificadas durante o processo de DA. Não foi constatado a diminuição de pH, conforme Figura 6, o acúmulo de AGV ou vazamentos de gás.

Os picos de produção diários foram encontrados para ambos os reatores no segundo dia de operação, com um valor máximo de produção de biogás diário de 6,84NL para o reator R4. O TRS foi muito semelhante para todos os reatores desta batelada, variando de 16 a 18 dias.

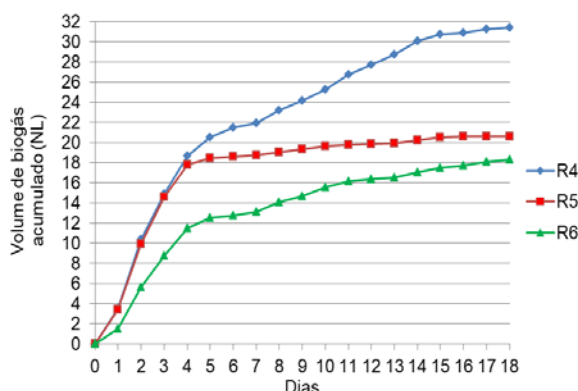


Figura 5 - Volume de biogás acumulado nos reatores da batelada 2

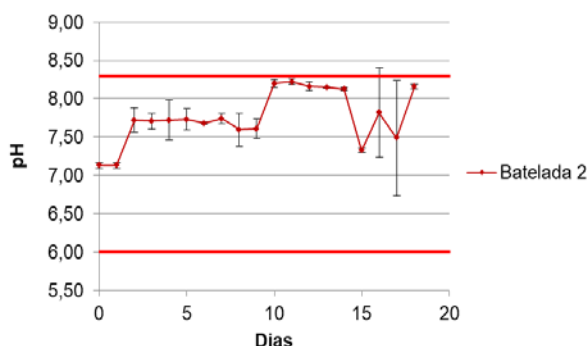


Figura 6 - Evolução do pH para a batelada 2

Lin et al. (2011) estudou a co-digestão de resíduo alimentar oriundo de restaurante universitário e resíduo de frutas e vegetais. O autor afirma que com o aumento da proporção de resíduo alimentar, há um acréscimo na produção de biogás até a proporção entre os dois substratos empregados de 1:1. O reator R4 da batelada 2 atingiu a máxima produção de biogás entre todos os reatores das bateladas ensaiadas neste trabalho, assim como sugere o trabalho de Lin et al. (2011), no entanto, a variação da produção de biogás acumulada entre os três reatores desta batelada fez com que as médias de produção sejam inferiores às encontradas na batelada 3.

O rendimento dos reatores que representam a batelada 2 podem ser verificados na Tabela 5. O reator R4 apresentou rendimento de $0,46 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{kgSTV}$ adicionados o qual se assemelha aos $0,49 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4 / \text{kgSTV}$ adicionados encontrados por Lin et al. (2011).

Tabela 5 - Volume acumulado de biogás, porcentagens de metano presentes no biogás, volume acumulado de metano e rendimento da batelada 2

Reator	Volume acumulado de biogás (Nml)	Porcentagem de metano no biogás (%)	Volume acumulado de metano (Nml)	Rendimento (Nm ³ CH ₄ /KgSTV)
R4	31,41	79,03(2,99)	24822,63	0,46
R5	20,57	79,17(4,68)	16284,58	0,30
R6	18,31	82,19(2,48)	15048,53	0,28

Média (desvio padrão)

n=3

BATELADA 3

A Figura 7 demonstra a produção acumulada de biogás dos reatores R7, R8 e R9 que compõem a batelada 3. Utilizou-se como substrato 75% de RHF e 25% da FORSU. A produção máxima acumulada de biogás da batelada 3 foi atingida pelo reator R7, com um total de 29,27NL e o menor volume de biogás produzido da referida batelada foi encontrado no reator R9 com 23,02NL, totalizando uma diferença de 6,25NL. A estabilidade operacional foi mantida por todos os reatores, conforme podemos observar no comportamento do pH demonstrado na Figura 8.

O TRS foi semelhante entre os reatores, variando entre 16 e 17 dias. Os picos de produção de biogás diários foram encontrados no terceiro dia para os reatores R7 e R8 respectivamente com 5,31NL e 5,36NL e no segundo dia para o reator R9 com 4,10NL.

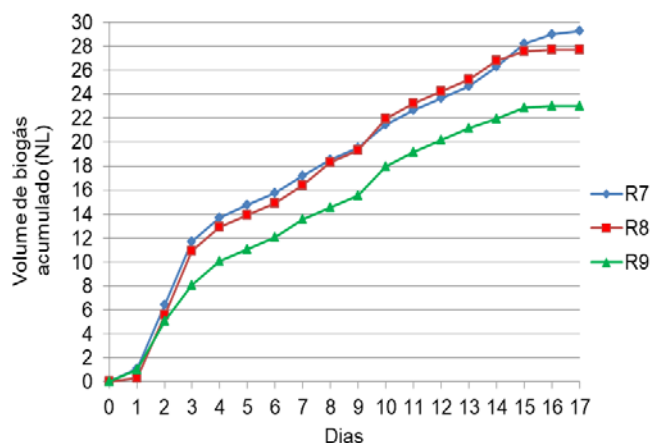


Figura 7 - Volume de biogás acumulado nos reatores da Batelada 3

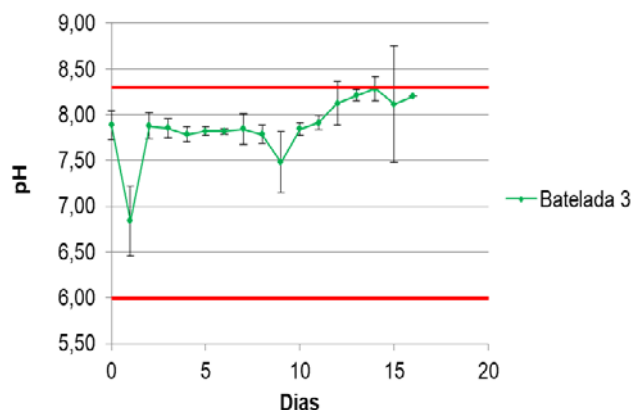


Figura 8 - Evolução do pH para a batelada 3

Para Lin et al. (2011) quando aplicado uma proporção entre substratos de 1:2, ou seja, 66,67% do substrato composto por resíduo de frutas e vegetais e 33,33% composto por resíduos alimentares oriundos de restaurante universitário, obteve-se rendimento de 0,44Nm³CH₄/kgSTV adicionados, valor idêntico ao encontrado para o reator R7 da batelada 3, conforme demonstra a Tabela 6.

Tabela 6 - Volume acumulado de biogás, porcentagens de metano presentes no biogás, volume acumulado de metano e rendimento da batelada 3

Reator	Volume acumulado de biogás (Nml)	Porcentagem de metano no biogás (%)	Volume acumulado de metano (Nml)	Rendimento (Nm ³ CH ₄ /KgSTV)
R7	29,27	80,31(3,39)	23507,47	0,44
R8	27,71	80,69(6,14)	22358,51	0,41
R9	23,02	82,92(4,01)	19087,42	0,35

Média (desvio padrão)

n=3

BATELADA 4

A produção de biogás acumulada da batelada 4 com seus respectivos reatores R10, R11 e R12 pode ser observada na Figura 9. Nesta batelada utilizou-se apenas um substrato, ou seja, 100% de RHF. O ponto máximo de produção acumulada de biogás foi atingido pelo reator R10 e o mínimo pelo reator R12, respectivamente com 21,68NL e 14,92NL, totalizando uma variação de 6,76NL.

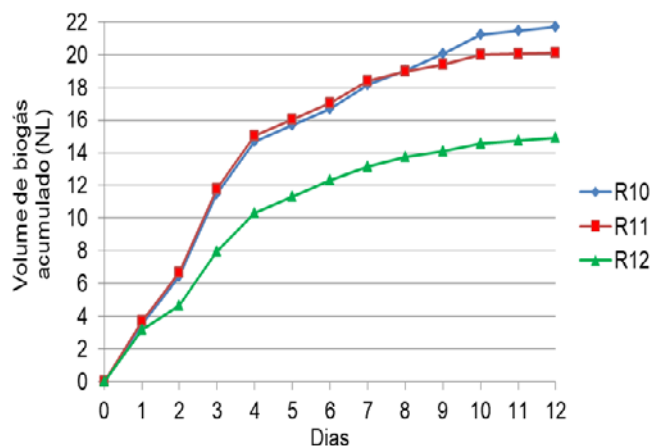


Figura 9 - Volume de biogás acumulado nos reatores da Batelada 4

O TRS para todos os reatores foi de 12 dias. Os picos de produção de biogás foram encontrados no terceiro dia para todos os reatores desta batelada, representando 5,05NL, 5,09NL e 3,33NL respectivamente para os reatores R10, R11 e R12. A estabilidade operacional, assim como nas demais bateladas, foi mantida por todos os reatores da batelada 4, conforme podemos observar no comportamento do pH demonstrado na Figura 10.

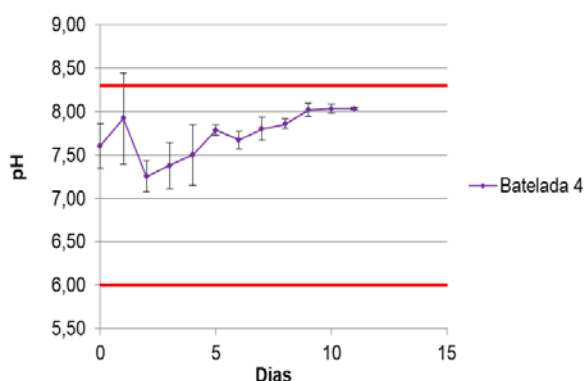


Figura 10 - Evolução do pH para a batelada 4

Lin et al. (2011) relata valor de rendimento de 0,42 Nm³CH₄/kgSTV adicionados, empregando apenas resíduos de frutas e vegetais, contudo, os valores encontrados neste trabalho não apresentaram rendimentos de tal magnitude. Para Scano et al. (2014) também utilizando como substrato resíduos de frutas e vegetais, os resultados mais satisfatórios de rendimento foram de 0,43 Nm³CH₄/kgSTV adicionados, valor semelhante ao encontrado por Lin et al. (2011) e superiores aos 0,31Nm³CH₄/kgSTV adicionados encontrados no reator de melhor rendimento desta batelada, conforme Tabela 7.

Tabela 7 - Volume acumulado de biogás, porcentagens de metano presentes no biogás, volume acumulado de metano e rendimento da batelada 4

Reator	Volume acumulado de biogás (Nml)	Porcentagem de metano no biogás (%)	Volume acumulado de metano (Nml)	Rendimento (Nm ³ CH ₄ /KgSTV)
R10	21,68	76,67(10,10)	16621,33	0,31
R11	20,10	80,83(7,64)	16247,50	0,30
R12	14,92	78,33(13,77)	11687,33	0,22

Média (desvio padrão)

n=3

COMPARAÇÃO DE PRODUÇÃO DE BIOGÁS ENTRE BATELADAS

O reator que apresentou a maior produção de biogás pertence à batelada 2, no entanto, os outros dois reatores desta mesma batelada apresentaram valores bem inferiores, tornando a média da batelada 2 inferior à média da batelada 3, assim como demonstra a Figura 11. Portanto produção máxima de biogás média acumulada foi atingida pela batelada 3 com 26,67NL a uma porcentagem média de metano de 81,31%, proporcionando um rendimento médio de 0,40 Nm³CH₄/kgSTV adicionados. Nenhum dos reatores ensaiados apresentou problemas de acidificação.

Conforme Figura 11 é evidente a superioridade de produção de biogás quando empregada a co-digestão anaeróbia. Diversos autores obtiveram resultados melhores quando combinaram dois resíduos frente a DA de apenas um (LIN et al., 2011; KHALID et al., 2011). O incremento de rendimento de metano médio da batelada 3 frente às bateladas 1 e 4 que digeriram apenas um resíduo são respectivamente 68,06% e 31,40%.

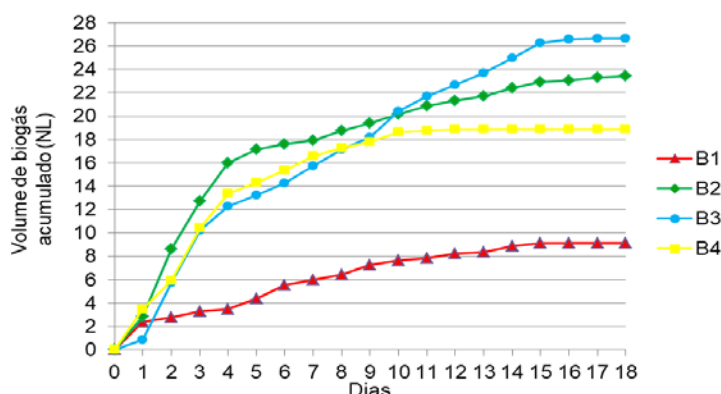


Figura 11 - Volumes médios de biogás acumulados em cada batelada

As porcentagens de metano encontradas em todas as bateladas ficaram em torno de 80% o que representa um valor elevado frente a inúmeros trabalhos realizados. Bouallagui et al. (2003) e Scano et al. (2014) na digestão de frutas e vegetais obtiveram porcentagens de metano de 64% e 50% a 60%, respectivamente. Borowski (2015) encontrou valores próximos a 60% de metano para a DA de RSU. Lin et al. (2011) também obteve valores próximos a 60% de metano em suas bateladas, com as maiores porcentagens de metano constatadas quando empregada a co-digestão à uma relação de 1:1 de resíduos alimentares e resíduos de frutas e vegetais, proporcionando 63,8% de metano presente no biogás.

CONCLUSÕES

- Tanto a FORSU quanto os RHF, apresentam características que indicam tendência à acidificação em processos de mono-digestão, como baixo pH e baixa alcalinidade;
- A estabilidade do inóculo utilizado influenciou nos resultados deste estudo. Devido ao elevado pH e alcalinidade presentes no lodo anaeróbio empregado como inóculo, foi possível operar os reatores com relação S/I de 1/1 (em termos de STV) em condições de estabilidade;
- As bateladas que empregaram a co-digestão de FORSU e RHF produziram maiores volumes de biogás e apresentaram maiores rendimentos de metano em relação aos processos de mono-digestão desses resíduos. Os melhores resultados médios foram encontrados na batelada 3, com 26,67NL de biogás acumulado, 81,31% de metano presente no biogás e rendimento de 0,40Nm³CH₄/kgSTV adicionados. A menor produção de biogás média foi encontrada na batelada 1, onde utilizou-se apenas a FORSU como substrato, obtendo-se apenas 9,14NL de biogás;
- A batelada que empregou apenas FORSU como substrato produziu o menor volume de biogás e obteve o menor rendimento de metano, em relação às outras condições de alimentação. A baixa taxa de conversão do substrato em metano pode estar relacionada à alta concentração inicial de AGV verificada nesta condição;
- O menor TRS foi verificado na batelada que empregou somente RHF como mono-substrato. Nessa batelada, a produção de biogás cessou no décimo segundo dia do processo de biodigestão;
- Verificou-se estabilidade do processo em todas as condições de alimentação. Essa estabilidade foi atribuída ao aumento progressivo da alcalinidade no meio, à manutenção do pH e à diminuição da concentração de AGV e AOV ao longo da batelada;
- Os teores de nitrogênio total, nitrogênio amoniacal e fósforo total presentes no bio sólido gerado em todas as condições de alimentação, indicam um potencial de utilização como biofertilizante. Contudo, mais análises são necessárias para avaliar esta aplicação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRAS. Associação Brasileira de Supermercados. 14ª Avaliação de perdas no varejo brasileiro. 2014.
2. ABRELPE. Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2017. 74 p. 2018.
3. BANKS, C. J.; CHESSHIRE, M.; HEAVEN, S.; ARNOLD, R. Anaerobic digestion of source-segregated domestic food waste: performance assessment by mass and energy balance. *Bioresource technology*, v. 102, n.2, p. 612–620, 2011.
4. BOROWSKI, S. Co-digestion of the hydromechanically separated organic fraction of municipal solid waste with sewage sludge. *Journal of environmental management*, v. 147, p. 87-94, 2015
5. BOUALLAGUI, H.; CHEIKH, R.B.; MAROUANI, L.; HAMDÍ, M. Mesophilic biogas production from fruit and vegetable waste in a tubular digester. *Bioresource Technology*, v. 86, n. 1, p. 85-89, 2003.
6. BOUALLAGUI, H.; TOUHAMI, Y.; CHEIKH, R.B.; HAMDÍ, M. Bioreactor performance in anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes. *Process Biochemistry*, v.40, n. 3-4, p. 989–995, 2005.
7. BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Plano Nacional de Resíduos Sólidos (volume 1). Brasília. 2012.
8. BRONZATTI L. F.; NETO A. I. Matrizes energéticas no Brasil: cenário 2010-2030. Encontro nacional de engenharias de produção, Rio de Janeiro, RJ, 2008.
9. CABBAL V.; BALLICO M.; ANEGGI E.; GOI D. BMP tests of source selected OFMSW to evaluate anaerobic codigestion with sewage sludge. *Waste Management*, v.33, p.1626–1632, 2013.
10. CHERNICHARO, C.A.L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias – Reatores Anaeróbios, v. 5. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental UFMG, 2007. 379 p.
11. CHO, H.S.; MOON, S.S.; LIM, J.Y.; KIM, J.Y. Effect of long chain fatty acids removal as a pretreatment on the anaerobic digestion of food waste. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, v. 15, n. 1, p.82-89, 2013.
12. DI MARIA, F.; SORDI, A.; CIRULLI, G.; MICALE, C. *Amount of energy recoverable from an existing sludge digester with the co-digestion with fruit and vegetable waste at reduced retention time. Applied Energy*, v. 150, p. 9-14, 2015.
13. FORSTER-CARNEIRO, T.; PÉREZ, M.; ROMERO, L.I.; SALES, D. *Dry-thermophilic anaerobic digestion of organic fraction of the municipal solid waste: focusing on the inoculum sources. Bioresource technology*, v. 98, n. 17, p. 3195-3203, 2007.
14. GE, X.; MATSUMOTO, T.; KEITH, L.; LI, Y. *Biogas energy production from tropical biomass wastes by anaerobic digestion. Bioresource Technology*, v. 169, p. 38-44, 2014
15. JAIGANESH, V.; NAGARAJAN, P. K.; GEETHA, A. *Solid state bio methane production from vegetable wastes Current state and perception. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 40, p. 432-437, 2014.
16. KHALID, A.; ARSHAD, M.; ANJUM, M.; MAHMOOD, T.; DAWSON, L. *The anaerobic digestion of solid organic waste. Waste Management*, v.31, n. 8, p.1737–1744, 2011.
17. LIN, J.; ZUO, J.; GAN, L.; LI, P.; LIU, F.; WANG, K.; CHEN, L.; GAN, H. *Effects of mixture ratio on anaerobic co-digestion with fruit and vegetable waste and food waste of China. Journal of environmental sciences*, v. 23, n. 8, p. 1403–1408, 2011.
18. MATA-ALVAREZ, J.; DOSTA, J.; ROMERO-GUÍZA, M.S; FONOLL, X.; PECES, M.; ASTALS, S. *A critical review on anaerobic co-digestion achievements between 2010 and 2013. Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v.36, p.412-427, 2014.
19. NAÇÕES UNIDAS (BRASIL). Aumento da pobreza está ligado ao desperdício de alimentos, avalia especialista do banco mundial. Brasília, DF, 9 abril de 2016. Disponível em: < <https://nacoesunidas.org/aumento-da-pobreza-esta-ligado-ao-desperdicio-de-alimentos-avalia-especialista-do-banco-mundial/>> Acesso em: 03 março 2019.
20. SCANO, E.A.; ASQUER, C.; PISTIS, A.; ORTU, L.; DEMONTIS, V.; COCCO, D. *Biogas from anaerobic digestion of fruit and vegetable wastes: experimental results on pilot-scale and preliminary performance evaluation of a full-scale power plant. Energy Conversion and Management*, v. 77, p. 22-30, 2014.
21. SCHULZ F. Biodigestão anaeróbia da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos. 2015. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil. Universidade do Vale do Rio dos Sinos – UNISINOS, São Leopoldo, RS. 2015.