

UFRRJ

**PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA,
TECNOLOGIA E INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA**

TESE

**Viabilidade Técnica e Econômica da Utilização do
Esterco Suíno Desidratado pelo Processo de Secagem
por Aspersão (*Spray Dryer*) na Co-Digestão com
Resíduos Sólidos Orgânicos Urbanos (RSOU) em
Meio Anaeróbico para a Produção de Biogás**

Marcus Val Springer

2024



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, TECNOLOGIA E
INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA**

**VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA DA UTILIZAÇÃO DO
ESTERCO SUÍNO DESIDRATADO PELO PROCESSO DE SECAGEM
POR ASPERSÃO (SPRAY DRYER) NA CO-DIGESTÃO COM
RESÍDUOS SÓLIDOS ORGÂNICOS URBANOS (RSOU) EM MEIO
ANAERÓBICO PARA A PRODUÇÃO DE BIOGÁS**

Marcus Val Springer

Sob a Orientação do Professor
Angel Ramon Sanchez Delgado

e Co-orientação do Professor
Jonni Guiler Ferreira Madeira

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutor**, no Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária. Área de Concentração em Recursos Naturais e Proteção Ambiental.

Seropédica
Dezembro de 2024

Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro
Biblioteca Central/Seção de Processamento Técnico

Ficha catalográfica elaborada
Com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S769v	<p>Springer, Marcus Val, 1976- Viabilidade técnica e econômica da utilização do esterco suíno desidratado pelo processo de secagem por aspersão (spray dryer) na co-digestão com resíduos sólidos orgânicos urbanos (RSOU) em meio anaeróbico para a produção de biogás / Marcus Val Springer. - Seropédica, 2024. 51 f. : il.</p> <p>Orientador: Angel Ramon Sanchez Delgado. Coorientador: Jonni Guiller Ferreira Madeira.</p> <p>Tese (Doutorado). -- Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária, 2024.</p> <p>1. Esterco Suíno. 2. Biogás. 3. Secagem por Aspersão. 4. Inóculo. 5. RSOU. I. Delgado, Angel Ramon Sanchez, 1956-, orient. II. Madeira, Jonni Guiller Ferreira, 1985-, coorient. III. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária. IV. Título.</p>
-------	---

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

É permitida a cópia parcial ou total desta Tese, desde que seja citada a fonte.



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, TECNOLOGIA E
INOVAÇÃO EM AGROPECUÁRIA



HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO Nº 39 / 2024 - PPGCTIA (12.28.01.84)

Nº do Protocolo: 23083.071049/2024-55

Seropédica-RJ, 18 de dezembro de 2024.

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO

PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO EM
AGROPECUÁRIA

MARCUS VAL SPRINGER

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor, no Programa de Pós-Graduação em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária, área de concentração em Recursos Naturais e Proteção Ambiental.

TESE APROVADA EM 16/12/2024

Angel Ramon Sanchez Delgado. Dr., UFRRJ

(Orientador)

Elizabeth Mendes de Oliveira. Dra., CEFET-RJ

Vanessa de Almeida Guimarães. Dra., UFRJ

Cintia de Faria Ferreira Carraro. Dra., CEFET-RJ

Leonardo Duarte Batista da Silva. Dr., UFRRJ

(Assinado digitalmente em 18/12/2024 15:17)

ANGEL RAMON SANCHEZ DELGADO
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DeptM (12.28.01.00.00.00.63)
Matrícula: 1219231

(Assinado digitalmente em 18/12/2024 14:29)

LEONARDO DUARTE BATISTA DA SILVA
PROFESSOR DO MAGISTERIO SUPERIOR
DEPTOENG (12.28.01.00.00.00.00.44)
Matrícula: 2353141

(Assinado digitalmente em 18/12/2024 14:56)

CINTIA DE FARIA FERREIRA CARRARO
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 101.782.897-01

(Assinado digitalmente em 24/12/2024 09:05)

ELIZABETH MENDES DE OLIVEIRA
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 088.092.867-07

(Assinado digitalmente em 30/12/2024 16:12)

VANESSA DE ALMEIDA GUIMARÃES
ASSINANTE EXTERNO
CPF: 131.582.167-28

Visualize o documento original em <https://sipac.ufrj.br/public/documentos/index.jsp> informando seu número: **39**, ano: **2024**, tipo: **HOMOLOGAÇÃO DE TESE DE DOUTORADO**, data de emissão: **18/12/2024** e o código de verificação: **f48336fd03**

DEDICATÓRIA

Aos meus pais,

Luiz Carlos Springer (em memória) e Juçara Val Springer,

E a minha esposa e enteado, Ana Lúcia de Almeida Araújo e Pedro Araújo Sacramento.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força e sustento.

A minha amada família, base de tudo.

Aos meus queridos pais que não se cansaram de me incentivar e puderam me proporcionar este momento de aprendizado e conquista. Eles estiveram sempre presentes me apoiando e me enchendo de muito amor.

Ao meu orientador, professor Angel Ramon Sanchez Delgado, por ter acreditado em mim e ter dado a liberdade necessária para a conclusão deste trabalho.

Ao meu amigo e coorientador, professor Jonni Guiller Ferreira Madeira. Não tenho palavras para agradecer toda a ajuda.

A Renata (secretaria PPGCTIA), pela presteza, simpatia e paciência.

A minha amada esposa, Ana Lucia de Almeida Araújo, por estar sempre ao meu lado e me incentivando nos momentos mais difíceis.

Ao CEFET/RJ pela possibilidade de fazer este doutorado em concomitância com as atividades docente.

Aos professores que compõem a banca, na certeza das excelentes contribuições que serão feitas para aprimoramento da tese.

Àqueles que não estão nomeados, mas que, de alguma forma, estiveram presentes e torceram pelo sucesso desta pesquisa.

Meu sincero agradecimento a todos vocês!

RESUMO

SPRINGER, Marcus Val. **Viabilidade técnica e econômica da utilização do esterco suíno desidratado pelo processo de secagem por aspersão (spray dryer) na co-digestão com resíduos sólidos orgânicos urbanos (RSOU) em meio anaeróbico para a produção de biogás.** 2024. 51 f. Tese (Doutorado em Ciência, Tecnologia e Inovação em Agropecuária). Pró - Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

Esta tese investigou a viabilidade técnica e econômica do uso do esterco suíno desidratado pelo processo de spray drying na co-digestão com resíduos sólidos orgânicos urbanos (RSOU) em biodigestores anaeróbicos de fase única para a produção de biogás. O trabalho surge da necessidade de enfrentar o desafio logístico e ambiental imposto pelo transporte de esterco suíno in natura para usinas de biogás. O processo de desidratação por spray drying reduz o volume do esterco em 74%, tornando sua logística e armazenamento mais viáveis, além de preservar as condições microbiológicas necessárias para a digestão anaeróbica. O principal objetivo foi investigar o potencial técnico e econômico do uso do esterco suíno desidratado pelo processo de secagem por aspersão (spray drying) na co-digestão com resíduos sólidos orgânicos (RSOU) para a produção de biogás por meio de biodigestores anaeróbicos de fase única. O estudo foi realizado por meio de experimentos laboratoriais em biodigestores de bancada. Foram avaliados e comparados os seguintes parâmetros: volume de biogás produzido; concentração de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂); composição físico-química inicial e final dos substratos. A metodologia incluiu a análise de variáveis de entrada e saída do sistema, bem como a aplicação de métodos de análise econômica, como o cálculo do Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), payback simples, payback descontado e Índice de Rentabilidade (IR). A produção de biogás utilizando esterco desidratado foi semelhante àquela obtida com esterco in natura. As concentrações de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂) mantiveram-se também semelhantes ao longo do experimento, indicando que o processo de secagem por spray drying não prejudica a viabilidade biológica do esterco como substrato. O volume do esterco foi reduzido em 74% após a desidratação, o que pode facilitar o transporte e o armazenamento. A análise de viabilidade econômica indicou que o uso de esterco desidratado torna o processo mais econômico para as usinas de biogás, especialmente aquelas distantes das granjas produtoras de suínos. O custo adicional da desidratação foi compensado pela economia de transporte e manuseio. O uso do esterco desidratado ajuda a reduzir a dependência de aterros sanitários para a disposição de resíduos sólidos urbanos. Além disso, a produção de biogás contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), visto que o metano gerado é capturado e transformado em energia. A tecnologia de secagem por aspersão (spray drying) mostrou-se tecnicamente viável e economicamente atrativa para o tratamento e uso do esterco suíno como inóculo em biodigestores de RSOU. O volume e a concentração de CH₄ do biogás produzido com o esterco desidratado são semelhantes a do biogás obtido com o esterco *in natura*. O trabalho abre novas possibilidades para a economia circular, ao permitir que o esterco suíno e o RSOU sejam processados de forma eficiente e ambientalmente sustentável.

Palavras-chave: Esterco Suíno. Biogás. Secagem por Aspersão. Inóculo. RSOU.

ABSTRACT

SPRINGER, Marcus Val. **Technical and economic feasibility of using dehydrated swine manure by the spray drying process in co-digestion with urban organic solid waste (OUS) in an anaerobic environment for biogas production.** 2024. 51 p. Thesis (Doctor in Science, Technology and Innovation in Agriculture). Pró - Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

This thesis investigated the technical and economic feasibility of using spray-dried swine manure in co-digestion with urban organic solid waste (UOSW) in single-phase anaerobic digesters for biogas production. The study emerged from the need to address the logistical and environmental challenges posed by the transportation of raw swine manure to biogas plants. The spray drying process reduces the volume of manure by 74%, making its logistics and storage more viable while preserving the microbiological conditions necessary for anaerobic digestion. The main objective was to investigate the technical and economic potential of using spray-dried swine manure in co-digestion with urban organic solid waste (UOSW) for biogas production through single-phase anaerobic digesters. The study was conducted through laboratory experiments using bench-scale digesters. The following parameters were evaluated and compared: volume of biogas produced; methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) concentrations; and initial and final physicochemical composition of the substrates. The methodology included the analysis of input and output variables of the system, as well as the application of economic analysis methods, such as Net Present Value (NPV), Internal Rate of Return (IRR), simple payback, discounted payback, and Profitability Index (PI). Biogas production using dehydrated manure was similar to that obtained with raw manure. Methane (CH₄) and carbon dioxide (CO₂) concentrations also remained similar throughout the experiment, indicating that the spray drying process does not compromise the biological viability of the manure as a substrate. The volume of manure was reduced by 74% after dehydration, which can facilitate transportation and storage. The economic feasibility analysis indicated that the use of dehydrated manure makes the process more economical for biogas plants, especially those located far from swine farms. The additional cost of dehydration was offset by savings in transportation and handling. The use of dehydrated manure helps reduce reliance on landfills for the disposal of urban solid waste. Furthermore, biogas production contributes to the reduction of greenhouse gas (GHG) emissions, as the generated methane is captured and converted into energy. The spray drying technology proved to be technically feasible and economically attractive for the treatment and use of swine manure as an inoculum in UOSW digesters. The volume and concentration of CH₄ in the biogas produced from dehydrated manure are similar to those of the biogas obtained from fresh manure. The study opens new possibilities for the circular economy by enabling the efficient and environmentally sustainable processing of swine manure and UOSW.

Keywords: Suine Manure. Biogas. Spray Drying. Inoculum. UOSW.

RESUMEN AMPLIADO

SPRINGER, Marcus Val. **Viabilidad técnica y económica del uso de estiércol porcino deshidratado mediante el proceso de secado por aspersión (spray dryer) en la co-digestión con residuos sólidos orgánicos urbanos (RSOU) en condiciones anaeróbicas para la producción de biogás.** 2024. 51 h. Tesis (Doctorado en Ciencia, Tecnología e Innovación en Agropecuaria). Pró - Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2024.

1. Introducción

La presente tesis investiga la viabilidad técnica y económica de la utilización de estiércol porcino deshidratado mediante secado por aspersión (*spray drying*) en la co-digestión con residuos sólidos orgánicos urbanos (RSOU) para la producción de biogás en biodigestores anaeróbicos de fase única. El estudio se alinea con las preocupaciones ambientales y económicas actuales, con el objetivo de contribuir a la gestión sostenible de residuos y a la generación de energía renovable.

El aumento de la población urbana ha incrementado la generación de residuos sólidos urbanos (RSU), que, si no se gestionan adecuadamente, representan riesgos ambientales y para la salud pública. En Brasil, se estima que el 65% de los RSU está compuesto por materia orgánica (ABREMA, 2023). La gestión eficaz de estos residuos requiere prácticas como la recolección selectiva y el reciclaje, que reducen el volumen destinado a vertederos y mitigan los impactos climáticos (FERRONATO et al., 2019).

El biogás, producido por la descomposición anaeróbica de materia orgánica, está compuesto principalmente por metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). Considerado una fuente de energía renovable, su calidad está determinada por la proporción de metano, que, cuando supera el 60%, se considera de alta calidad (WEILAND, 2010; MATA-ALVAREZ, 2014). El estiércol porcino, rico en bacterias metanogénicas, puede aumentar la producción de biogás y elevar la concentración de metano hasta un 80% (APPELS, 2011; LI, 2022). Sin embargo, su uso en estado natural cerca de centros urbanos enfrenta desafíos como costos de transporte, almacenamiento e impactos ambientales (CALISE et al., 2022).

El secado por aspersión es un método eficiente para reducir la humedad del estiércol porcino, que varía entre el 70% y el 85% en su estado natural (LEHMANN et al., 2020). Este proceso facilita el almacenamiento y transporte, además de permitir la reactivación de las bacterias anaeróbicas después de la rehidratación (LEHNEN, 2014).

La investigación busca responder: **¿Cuál es el potencial técnico y económico del estiércol porcino deshidratado por secado por aspersión en la co-digestión con RSOU para la producción de biogás?** Los objetivos específicos incluyen: comparar la caracterización físico-química del biodigestor con estiércol en estado natural y deshidratado; comparar los volúmenes de biogás producidos; analizar las concentraciones de metano y CO₂.

Las hipótesis son: el uso de estiércol deshidratado es técnica y económicamente viable; los volúmenes de biogás producidos son similares en ambas condiciones; las concentraciones de metano y CO₂ son equivalentes.

La investigación tiene relevancia ambiental, al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y promover la gestión sostenible de residuos, y económica, al diversificar la matriz energética y reducir los costos de gestión de residuos (ARDOLINO, PARRILLO y ARENA, 2018).

La tesis está organizada en cinco capítulos: Introducción; Marco Teórico; Metodología; Resultados y Discusión; Consideraciones Finales.

La investigación llena un vacío al estudiar la co-digestión de RSOU y estiércol porcino deshidratado, ofreciendo una alternativa viable para la gestión de residuos y la producción de energía renovable. Los resultados pueden optimizar el proceso de co-digestión y maximizar la producción de biogás, contribuyendo a la sostenibilidad ambiental y energética.

2. Metodología

La investigación se clasifica en cuanto a su naturaleza, enfoque, objetivos y procedimientos técnicos, según Silva y Menezes (2005).

Con respecto a la recolección y preparación de los materiales, el residuo sólido urbano orgánico (RSUO) se obtuvo en base a la composición gravimétrica del municipio de Río de Janeiro/RJ, que genera aproximadamente 8.600 toneladas diarias de RSUO. El RSUO simulado se preparó a partir de alimentos descritos en la composición gravimétrica de la Unidad de Transferencia de Residuos (UTR) de Caju. El estiércol porcino in natura se recolectó de una granja en Angra dos Reis/RJ, donde los cerdos eran alimentados principalmente con pienso. El estiércol deshidratado se obtuvo mediante secado por aspersión (spray drying), utilizando un equipo modelo Buchi mini spray dryer B290, con parámetros optimizados mediante la Metodología de Superficie de Respuesta (MSR).

Para la caracterización físico-química, se realizaron análisis físico-químicos de las muestras de RSUO, estiércol porcino y mezclas antes y después del proceso de biodigestión. Los parámetros analizados incluyeron humedad, sólidos volátiles (SV), sólidos totales (ST), pH, carbono (C) y nitrógeno (N), siguiendo los métodos descritos en el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2002).

En el procedimiento experimental, se utilizaron dos biodigestores de banco construidos en acero inoxidable, con un volumen de 4,42 litros cada uno. Uno fue alimentado con RSUO y estiércol porcino in natura, y el otro con RSUO y estiércol porcino deshidratado, más agua para igualar el volumen. El volumen de biogás producido se midió diariamente mediante manómetros durante 30 días. La producción de biogás se estimó utilizando la ecuación de los gases ideales. La composición del biogás (metano y CO₂) se analizó cada 5 días utilizando un cromatógrafo de gases.

En el análisis económico, la investigación incluyó un estudio de viabilidad para evaluar la factibilidad de una planta de producción de estiércol porcino deshidratado. Se consideraron inversiones iniciales en equipos, costos operativos (energía, mano de obra, mantenimiento) y un margen de ganancia del 50%. El flujo de caja se proyectó para 20 años, utilizando indicadores como VPN, TIR, payback simple y descontado, con una tasa mínima de atractividad (TMA) del 16% anual.

La metodología adoptada permitió comparar el uso de estiércol porcino in natura y deshidratado en la co-digestión con RSUO, evaluando la producción de biogás, la composición del gas y la viabilidad económica del proceso. Los resultados contribuyen a la optimización de la producción de biogás y a la gestión sostenible de residuos urbanos.

4. Resultados y Discusión

En la caracterización físico-química, ambos biodigestores presentaron un alto contenido inicial de sólidos volátiles (86-90%), lo que indica un elevado potencial de degradación. La reducción de este parámetro después de 30 días de digestión fue pequeña, sugiriendo que aún había sustratos susceptibles de degradación. Los valores de pH se mantuvieron estables, entre 5 y 6, en ambos biodigestores. La relación carbono/nitrógeno

(C/N) mostró una pérdida de aproximadamente 2 puntos, pero se mantuvo dentro del rango considerado ideal.

En cuanto a la producción de biogás, se utilizaron dos biodigestores, uno con estiércol porcino in natura y otro con estiércol deshidratado por spray drying. Después de 30 días, ambos presentaron una meseta en la producción de biogás, lo que indica que el uso de estiércol deshidratado no afectó significativamente la producción. La falta de humedad en el estiércol deshidratado retrasó el proceso de hidrólisis, pero no comprometió la producción final. La concentración de metano (CH₄) fue superior al 60% en todas las mediciones, lo que indica un biogás de alta calidad. La composición promedio del biogás fue de 60-65% de CH₄ y 35-40% de CO₂.

En el análisis económico, se simuló la creación de una empresa para la producción de estiércol porcino deshidratado por spray drying, con inversiones iniciales en equipos, infraestructura y mano de obra. La inversión total fue de R\$1.179.105,10, dividida en 10 años con una tasa de interés del 18% anual.

Los gastos mensuales incluyeron energía eléctrica, mantenimiento, alquiler, servicios contables y jurídicos, además de mano de obra. La capacidad máxima de producción fue de 187 kg/día de estiércol deshidratado.

El análisis de viabilidad financiera mostró que la planta de biogás de fase continua tuvo una ganancia de R\$710,17, mientras que la planta de fase única tuvo una pérdida de R\$6.833,21. El uso de estiércol deshidratado aumentó la concentración de metano en un 30%, mejorando la eficiencia del proceso.

Los indicadores de viabilidad (VAN, TIR, payback descontado e índice de rentabilidad) fueron positivos tanto para la inversión al contado como para la financiada en 10 cuotas. El payback descontado fue de 2,23 años para la inversión al contado y de 1,14 años para la financiada. La TIR superó la tasa mínima de atractividad (TMA) del 16% anual, con un VAN positivo de R\$1.356.391,04 (inversión al contado) y R\$1.368.901,11 (financiada).

La investigación demostró que el uso de estiércol porcino deshidratado por spray drying es técnica y económicamente viable, manteniendo la producción de biogás y la calidad del gas (alta concentración de metano). El análisis económico mostró que la inversión en una planta de producción de estiércol deshidratado es rentable, con retorno a corto plazo y alta rentabilidad, especialmente cuando se financia en cuotas. Los resultados contribuyen a la optimización de la producción de biogás y a la gestión sostenible de residuos urbanos.

5. Conclusiones

Los resultados confirmaron que el uso de estiércol deshidratado es técnica y económicamente viable, presentando ventajas logísticas y ambientales en comparación con el estiércol in natura.

En cuanto a la viabilidad técnica, no hubo diferencias significativas en el volumen de biogás producido entre el uso de estiércol deshidratado e in natura. La concentración de metano fue similar en ambos casos, lo que indica que el secado por *spray drying* no comprometió la eficiencia del proceso de metanogénesis. En los parámetros físico-químicos, variables como el pH, la temperatura y la relación C/N fueron controladas adecuadamente, permitiendo una comparación justa entre las dos metodologías.

En la viabilidad económica, el proceso de secado redujo el volumen del estiércol en un 74%, lo que puede resultar en un ahorro significativo en los costos de transporte y almacenamiento.

Con respecto a los indicadores financieros, el Valor Presente Neto (VPN), la Tasa Interna de Retorno (TIR), el payback simple, el payback descontado y el Índice de

Rentabilidad (IR) demostraron la viabilidad financiera del proyecto. El escenario con financiamiento resultó más ventajoso que la inversión al contado.

En cuanto a las contribuciones ambientales y sociales, la co-digestión con RSOU y estiércol porcino contribuye a la mitigación de las emisiones de metano (CH₄) y dióxido de carbono (CO₂). El uso de RSOU en biodigestores reduce la cantidad de residuos depositados en vertederos. Además, la investigación está alineada con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 7 (Energía Limpia y Asequible), el ODS 11 (Ciudades y Comunidades Sostenibles) y el ODS 12 (Producción y Consumo Responsables).

Como recomendaciones para futuras investigaciones, se sugiere realizar estudios a escala real para validar los resultados obtenidos en el laboratorio. También se recomienda evaluar el impacto de las fluctuaciones en los precios del transporte, los costos de energía y los insumos. Es importante investigar nuevos parámetros operativos para reducir costos y realizar análisis de ciclo de vida (ACV) para evaluar los impactos ambientales del proceso.

La investigación demostró que el uso de estiércol porcino deshidratado por *spray drying* en la co-digestión con RSOU es una alternativa técnica, económica y ambientalmente sostenible para la producción de biogás. La reducción de costos logísticos, el aumento de la viabilidad de plantas de biogás cercanas a centros urbanos y la contribución a la gestión sostenible de residuos refuerzan la relevancia de esta investigación. Se espera que este trabajo incentive nuevas iniciativas en economía circular y bioenergía, promoviendo prácticas más responsables y sostenibles en el manejo de residuos.

Palabras clave: Estiércol de cerdo. Biogás. Secado por asperción. Inóculo. RSOU.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Processo de digestão anaeróbica. Fonte: Adaptado de Wellinger et al. (2013); Deublein e Steinhauser (2011) e Chernicharo, 1997.....	5
Figura 2. Representação esquemática do processo de secagem por spray dryer. Fonte: Adaptado de Anandharamakrishnan e Ishwarya (2015) e Anandharamakrishnan (2017).17	17
Figura 3. Porcos na granja situada na região rural Serra d'água, município de Angra dos Reis/RJ. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.....	25
Figura 4. Equipamento spray dryer utilizado na pesquisa. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.....	26
Figura 5. Visão esquemática do biodigestor projetado. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	27
Figura 6. Foto dos biodigestores utilizados no experimento. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.....	28
Figura 7. Processador industrial utilizado no experimento. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.....	29
Figura 8. Modelo do manômetro utilizado na pesquisa. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	29
Figura 9. Modelo de cromatógrafo utilizado na pesquisa. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.	30
Figura 10. produção de biogás ao longo dos 30 dias de operação do biodigestor em dois diferentes cenários. Fonte: Elaborado pelo Autor.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Comparação das características do biogás proveniente da co-digestão do esterco suíno in natura com RSOU com o biogás proveniente da digestão anaeróbica do esterco suíno isolado e com o biogás oriundo da digestão anaeróbica de RSOU.....	14
Tabela 2. Formas de classificação das pesquisas.....	22
Tabela 3. Classificação da pesquisa.	24
Tabela 4. Composição gravimétrica e características físico-químicas da fração orgânica do RSOU da UTR do Caju.	24
Tabela 5. RSOU utilizado no referido estudo.....	25
Tabela 6. Planejamento composto central utilizado para otimizar a secagem por spray drying da solução de esterco suíno, empregando a MSR.....	26
Tabela 7. Parâmetros de caracterização de inóculo, substrato e meios reacionais com respectivos métodos analíticos empregados.	27
Tabela 8. Caracterização físico-química inicial e final dos biodigestores.....	33
Tabela 9. Composição média de CH ₄ , CO ₂ e H ₂ S para todos os tratamentos empregados.....	34
Tabela 10. Itens do investimento inicial.....	35
Tabela 11. Descritivo do parcelamento do investimento.....	35
Tabela 12. Despesas mensais com consumo de energia elétrica, manutenção dos equipamentos, aluguel e serviços contábeis e jurídicos.....	36
Tabela 13. Despesas com mão-de-obra.	36
Tabela 14. Memória de cálculo do cálculo do preço do produto.....	37
Tabela 15. Comparativo da viabilidade financeira entre usinas de biogás de fase única e contínua utilizando o esterco suíno desidratado pelo processo de spray drying.	37
Tabela 16. Projeção do fluxo de caixa com investimento no período zero até o ano 9.....	39
Tabela 17. Continuação da projeção do fluxo de caixa com investimento no período zero do ano 10 ao ano 20.	40
Tabela 18. Indicadores da análise de investimento para um horizonte de 20 anos a partir do FCD com investimento período zero.	41
Tabela 19. Projeção do fluxo de caixa com investimento financiado em 10 parcelas anuais até o ano 9.....	42
Tabela 20. Continuação da projeção do fluxo de caixa com investimento financiado em 10 parcelas anuais do ano 10 ao ano 20.....	43
Tabela 21. Indicadores da análise de investimento para um horizonte de 20 anos a partir do FCD com investimento parcelado em 10 parcelas anuais.	44

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

ANOVA	Análise de Variância
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
ASBR	Anaerobic Sequencing Batch Reactor (Reator de Manto de Lodo)
C	Carbono
CH ₃	Metano
CO ₂	Dióxido de Carbono
COV	Composto Orgânico Volátil
C/N	Relação Carbono-Nitrogênio
CSTR	<i>Continuous Stirred Tank Reactor</i> (Reator de Fluxo Contínuo)
EGSB	Expanded Granular Sludge Bed (Reator de Leito Expandido)
FC	Fluxo de Caixa
FCD	Fluxo de Caixa Descontado
GEE	Gases de Efeito Estufa
H	Hidrogênio
H ₂ S	Sulfeto de Hidrogênio
IL	Índice de Lucratividade
Mg	Margem de Lucro
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta
N	Nitrogênio
O	Oxigênio
ODS	Objetivos de Desenvolvimento Sustentável
PCC	Planejamento Composto Central
pH	Potencial Hidrogeniônico
RSU	Resíduo Sólido Urbano
RSUO	Resíduo Sólido Urbano Orgânico
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
TCO	Taxa de Carregamento Orgânico
TIR	Taxa Interna de Retorno
TMA	Taxa Mínima de Atratividade
TRH	Tempo de Retenção Hidráulica
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket (Reator de Leito Fixo)
UTR	Unidade de Tratamento de Resíduos
VP	Valor Presente
VPL	Valor Presente Líquido

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Digestão Anaeróbica.....	4
2.1.1 Microrganismos	4
2.1.2 Parâmetros operacionais.....	5
2.2 Fatores que Influenciam na Digestão Anaeróbia.....	6
2.2.1 Temperatura	6
2.2.2 Potencial hidrogeniônico - pH	6
2.2.3 Relação carbono-nitrogênio (C/N).....	7
2.2.4 Taxa de carregamento orgânico - TCO.....	8
2.2.5 Tempo de retenção hidráulica - TRH.....	8
2.3 Reatores Anaeróbicos	9
2.3.1 Reator de fluxo contínuo (CSTR).....	9
2.3.2 Reator de leito fixo (UASB)	9
2.3.3 Reator de leito expandido (EGSB).....	9
2.3.4 Reator de manto de lodo (ASBR)	10
2.4 Tratamento do Esterco Suíno em Granjas	10
2.5 Caracterização do Biogás a partir de Esterco Suíno In Natura.....	11
2.6 Caracterização do Biogás a partir de RSOU.....	12
2.7 Caracterização do Biogás a partir da Co-Digestão de RSOU e Esterco Suíno In Natura	13
2.8 Processo de Secagem por Aspersão (<i>Spray Drying</i>)	15
2.9 Análise Econômica	17
2.10 Discussão sobre Lacunas na Literatura.....	20
3. METODOLOGIA.....	22
3.1 Caracterização da Pesquisa.....	22
3.2 Coleta e Preparo do RSUO	24
3.3 Coleta e Preparo do Inóculo.....	25
3.3.1 Esterco suíno in natura	25
3.3.2 Esterco suíno desidratado pelo processo <i>spray drying</i>	25
3.4 Caracterização Físico-Química das Amostras	26
3.5 Procedimento Experimental.....	27
3.5.1 Biodigestores de bancada.....	27
3.5.2 Batelada experimental.....	28

3.5.3 Volume de biogás produzido	29
3.5.4 Caracterização do biogás.....	30
3.5.5 Análise econômica	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1 Caracterização Físico-Química Inicial e Final dos Biodigestores	33
4.2 Comparação dos Volumes de Biogás Produzidos Durante o Processo de Produção no Biodigestor Anaeróbico de Fase Única na Co-digestão de Esterco Suíno In Natura com RSUO e na Utilização de Esterco Suíno Desidratado pelo Processo de Secagem por Aspersão (<i>Spay Drying</i>) com RSUO	33
4.3 Comparação das Concentrações de Metano e Dióxido de Carbono Durante o Processo de Produção no Biodigestor Anaeróbico de Fase Única na Co-digestão de Esterco Suíno In Natura com RSUO e na Utilização de Esterco Suíno Desidratado pelo Processo de Secagem por Aspersão (<i>Spay Drying</i>) com RSUO	34
4.4 Investigação do Potencial Econômico do Uso do Esterco Suíno Desidratado pelo Processo de Secagem por Aspersão (<i>Spay Drying</i>) na Co-digestão com Resíduos Sólidos Urbanos Orgânicos (RSUO) para a Produção de Biogás por Meio de Biodigestores Anaeróbicos de Fase Única.....	35
5. CONCLUSÕES	45
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1. INTRODUÇÃO

O crescente aumento da população urbana em todo o mundo tem gerado um desafio significativo para as autoridades municipais e ambientais: o gerenciamento eficaz do resíduo sólido urbano (RSU). O RSU, composto principalmente por resíduos domésticos, comerciais e institucionais, representa uma ameaça ambiental e de saúde pública se não for tratado adequadamente.

A complexidade do problema do RSU reside não apenas na quantidade de resíduos gerados, mas também na diversidade de materiais e na necessidade de abordagens integradas para sua gestão. De acordo com De Paula et al. (2022), a falta de infraestrutura adequada, políticas eficazes e conscientização pública são alguns dos principais desafios enfrentados pelos gestores de resíduos sólidos urbanos.

Uma das estratégias fundamentais para lidar com o RSU é a implementação de sistemas de coleta seletiva e reciclagem. Segundo Ferronato et al. (2019), a reciclagem de materiais como plástico, papel, vidro e metal não só reduz a quantidade de resíduos destinados a aterros sanitários, mas também contribui para a conservação de recursos naturais e a mitigação das mudanças climáticas.

De acordo com a ABREMA (2023), no ano de 2022 no Brasil foram geradas 77.076.428 toneladas de RSU. Estima-se que o percentual de resíduos orgânicos dentro do RSU é de 65%. Essa estimativa pode variar dependendo da região do país, características socioeconômicas e culturais das comunidades, bem como das políticas de gestão de resíduos adotadas em cada localidade.

Esse Resíduo Sólido Urbano Orgânico – RSUO pode ser utilizado como insumo para a produção de biogás em biodigestores anaeróbicos. O biogás, basicamente, é uma mistura de metano e dióxido de carbono produzida pela decomposição anaeróbica de matéria orgânica. O biogás apresenta-se como uma fonte de energia renovável com múltiplos benefícios. Sua produção a partir de RSUO não apenas contribui para a redução do volume de resíduos destinados a aterros sanitários, mas também oferece uma oportunidade valiosa de produção de energia limpa e descentralizada.

A proporção entre metano e dióxido de carbono é crucial para determinar a qualidade e o potencial energético do biogás. Um maior teor de metano indica uma maior qualidade do biogás, uma vez que o metano é um combustível mais eficiente e de maior valor energético do que o dióxido de carbono. De acordo com Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993), o biogás proveniente da degradação anaeróbia de RSUO é composto, principalmente, por metano (40 a 60%) e gás carbônico (40 a 60%). No entanto, para Weiland (2010) e corroborado por Mata-Alvarez (2014) e Angelidaki et al. (2018), o biogás é considerado de qualidade quando seu teor de metano está acima 60% e serve para avaliar a eficácia do biogás como fonte de energia renovável.

O esterco suíno é uma fonte rica em microrganismos anaeróbicos, especialmente bactérias metanogênicas, que são essenciais para a decomposição dos resíduos orgânicos e a produção de biogás (APPELS, 2011). Estudos têm demonstrado que o esterco suíno pode aumentar significativamente a atividade biológica nos reatores anaeróbicos, resultando em maior produção de biogás e maior teor de metano (LI, 2022). Com o uso de esterco suíno, a concentração de metano no biogás pode chegar a 80% (IBRO, ANCHA, LEMA, 2022).

No entanto, o uso de esterco suíno na produção de biogás em biodigestores próximos a centros urbanos apresenta desafios significativos do ponto de vista econômico e ambiental. O baixo valor agregado associado aos custos de transporte, armazenamento e tratamento do esterco, juntamente com os impactos ambientais negativos da sua aplicação (por exemplo,

odores desagradáveis e risco de contaminação do solo e da água), destacam a necessidade de uma cuidadosa avaliação dos benefícios e riscos antes de adotar essa prática (CALISE et al., 2022).

Lehmann et al. (2020) afirmam que o esterco suíno in natura apresenta um teor de umidade elevado, que pode variar de 70% a 85% ou mais. A água desempenha um papel crucial no processo de digestão anaeróbica, proporcionando o ambiente adequado para o crescimento e atividade das bactérias. No entanto, em condições de dessecação extrema, as bactérias anaeróbicas presentes no esterco suíno podem entrar em um estado de dormência (KROHN et al., 2022).

Estudos demonstram que a reidratação do esterco suíno pode permitir a recuperação da atividade metabólica das bactérias anaeróbicas. A reintrodução de água ao substrato desidratado pode reativar as células bacterianas dormentes, permitindo que retomem suas funções metabólicas normais (LEHNEN, 2014).

A secagem por aspersão, também conhecida como *spray drying*, é um método amplamente utilizado na indústria para a produção de pós secos a partir de líquidos ou suspensões. Isso faz com que o processo de secagem por aspersão seja significativamente mais rápido do que a secagem em estufa (MUJUMDAR, 2014).

Com base nos argumentos apresentados, tem-se a seguinte pergunta de pesquisa: qual o potencial técnico e econômico do esterco suíno desidratado pelo processo de secagem por aspersão (*spray drying*) na co-digestão com resíduos sólidos orgânicos urbanos (RSOU) para a produção de biogás por meio de biodigestores anaeróbicos de fase única?

Desta forma, o objetivo geral desta pesquisa será investigar o potencial técnico e econômico do uso do esterco suíno desidratado pelo processo de secagem por aspersão (*spay drying*) na co-digestão com resíduos sólidos urbanos orgânicos (RSUO) para a produção de biogás por meio de biodigestores anaeróbicos de fase única.

Os objetivos específicos que também sustentaram essa tese são:

- Comparar a caracterização físico-química inicial e final do biodigestor de fase única na co-digestão de esterco suíno in natura com RSUO e no biodigestor de fase única co-digestão de esterco suíno desidratado pelo processo de secagem por aspersão (*spay drying*) com RSUO;
- comparar os volumes de biogás produzidos durante o processo de produção no biodigestor anaeróbico de fase única na co-digestão de esterco suíno in natura com RSUO e na utilização de esterco suíno desidratado pelo processo de secagem por aspersão (*spay drying*) com RSUO;
- Comparar as concentrações de metano e dióxido de carbono durante o processo de produção no biodigestor anaeróbico de fase única na co-digestão de esterco suíno in natura com RSUO e na utilização de esterco suíno desidratado pelo processo de secagem por aspersão (*spay drying*) com RSUO.

Essa pesquisa adotou as seguintes hipóteses:

- É viável tecnicamente e economicamente o uso do esterco suíno desidratado pelo processo de secagem por aspersão (*spay drying*) na co-digestão com resíduos sólidos urbanos orgânicos (RSUO) para a produção de biogás por meio de biodigestores anaeróbicos de fase única;

os volumes de biogás produzidos durante o processo de produção no biodigestor anaeróbico de fase única na co-digestão de esterco suíno in natura com RSUO e na utilização de esterco suíno desidratado pelo processo de secagem por aspersão (*spay drying*) com RSUO são similares;

– As concentrações de metano e dióxido de carbono durante o processo de produção no biodigestor anaeróbico de fase única na co-digestão de esterco suíno in natura com RSUO e na utilização de esterco suíno desidratado pelo processo de secagem por aspersão (*spay drying*) com RSUO são similares.

Essa pesquisa tem relevância tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, dadas as preocupações crescentes com a gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos (RSU) e a busca por fontes de energia renovável.

Do ponto de vista ambiental, o aumento da população urbana global tem levado a um crescimento exponencial na geração de resíduos sólidos urbanos, representando um desafio ambiental e de saúde pública (SILVA et al., 2019). A co-digestão de resíduos orgânicos urbanos (RSOU) e esterco suíno desidratado pode contribuir significativamente para a redução de emissões de gases de efeito estufa e para a gestão sustentável de resíduos, ao mesmo tempo em que gera energia renovável (ABREMA, 2023; APPELS, 2011).

Do ponto de vista econômico, a produção de biogás a partir da co-digestão de RSUO e esterco suíno desidratado pode representar uma fonte econômica de energia renovável, contribuindo para a diversificação da matriz energética e reduzindo os custos associados à gestão de resíduos. A avaliação técnica e econômica dessa prática é crucial para identificar sua viabilidade e potencial de implementação em diferentes contextos urbanos (ARDOLINO, PARRILLO e ARENA, 2018).

A pesquisa preenche uma lacuna na literatura ao investigar o potencial técnico e econômico da co-digestão de RSOU e esterco suíno desidratado, utilizando o processo de *spray dryer*, para a produção de biogás em biodigestores anaeróbicos. Além disso, cria uma alternativa ambientalmente e economicamente viável para utilizar o esterco suíno na co-digestão com RSOU em biodigestores anaeróbicos localizados próximos aos grandes centros.

Ao comparar diferentes concentrações de carga orgânica e analisar parâmetros como volumes de biogás, concentrações de metano e dióxido de carbono, pH, temperatura e concentrações de íons de Nitrogênio e Carbono, a pesquisa fornece informações valiosas para otimizar o processo de co-digestão e maximizar a produção de biogás.

A partir desta Introdução, a presente tese está dividida em cinco capítulos. O Capítulo 2 apresenta um o referencial teórico que sustenta esse trabalho, discorrendo sobre os principais tópicos de interesse. Já o Capítulo 3 se concentra metodologia utilizada para se obter os dados que formam o objeto de estudo dessa pesquisa.

Os resultados obtidos assim como a discussão desses resultados estão descritos no Capítulo 4. O Capítulo 5 discorre sobre as considerações finais da presente tese, feitas a partir da reflexão dos capítulos anteriores. Por fim, têm-se as referências bibliográficas que deram suporte ao desenvolvimento desta pesquisa.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo será realizada uma revisão da literatura dos trabalhos científicos mais relevantes ao tema desta tese. Em particular serão abordados os seguintes temas que formam o conjunto de conceitos que ajudarão no entendimento deste trabalho: digestão anaeróbica assim como os fatores que interferem nessa digestão para a produção de biogás; os tipos de reatores anaeróbicos para a produção de biogás; as características do esterco suíno como substrato na produção de biogás; as características do RSOU como substrato na produção de biogás; as características da co-digestão de RSOU e esterco suíno in natura na produção de biogás; o processo de secagem por aspersão (*spray drying*); e as ferramentas de análise econômica para avaliar projetos de investimento.

2.1 Digestão Anaeróbica

A digestão anaeróbia é um processo biológico amplamente estudado e aplicado na conversão de matéria orgânica em biogás, um combustível renovável e uma fonte de energia. Este processo ocorre na ausência de oxigênio e é mediado por uma variedade de microrganismos anaeróbios, principalmente bactérias e arqueias metanogênicas. A compreensão dos princípios fundamentais da digestão anaeróbia é crucial para otimizar a eficiência do processo e maximizar a produção de biogás.

A digestão anaeróbia é um processo microbiano misto onde, na ausência de oxigênio molecular, a matéria orgânica é convertida a gases, predominantemente metano e dióxido de carbono. Ou simplesmente: um tratamento biológico anaeróbio de estabilização de matéria orgânica com produção de biogás (essencialmente metano e dióxido de carbono) (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

Para Lastella et al. (2002) a digestão anaeróbia é um processo complexo, onde condições ambientais específicas e uma população microbiana mista são requeridas para degradar compostos orgânicos produzindo biogás, uma mistura valiosa de gases (principalmente CH₄ e CO₂).

2.1.1 Microrganismos

Os microrganismos anaeróbios envolvidos na digestão anaeróbia podem ser classificados em quatro grupos principais: hidrolisadores, acidogênicos, acetogênicos e metanogênicos. Cada grupo desempenha um papel específico na degradação da matéria orgânica e na produção de metabólitos intermediários, como ácidos graxos voláteis, acetato e, finalmente, metano (HAO et al., 2015). A Figura 1 mostra as fases do processo de digestão anaeróbica onde essas bactérias atuam.

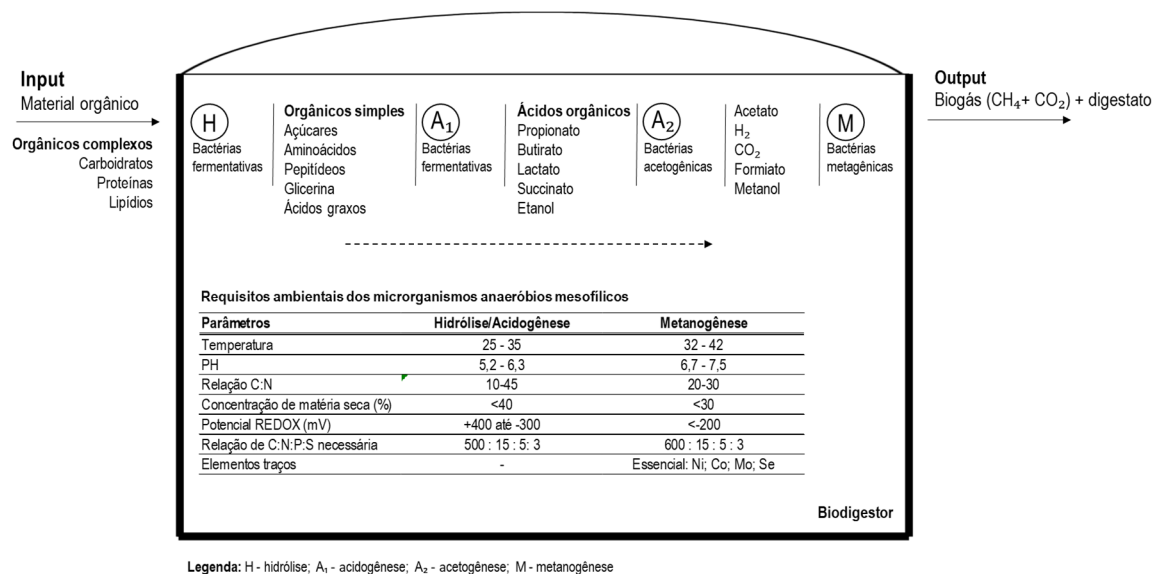


Figura 1. Processo de digestão anaeróbica. Fonte: Adaptado de Wellinger et al. (2013); Deublein e Steinhauser (2011) e Chernicharo, 1997.

Durante a hidrólise, macromoléculas orgânicas (carboidratos, proteínas e gorduras) são convertidas a ácido acético, ácidos graxos de cadeia longa e CO₂ (LASTELLA et al., 2002). Na acetogênese, os produtos resultantes da hidrólise são convertidos a ácidos, especialmente ácido acético (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL, 1993). De acordo com Lastella et al. (2002), nesta etapa, CO₂, H₂, ácidos graxos de cadeia longa, hidratos de carbono e álcool são convertidos em ácido acético, o qual desempenha um papel primordial na digestão anaeróbia, por ser um precursor do metano. Na terceira e última etapa, ocorre a conversão de hidrogênio e ácido acético em gás metano e dióxido de carbono (TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL, 1993), conversão mediada pelas bactérias metanogênicas, que são altamente sensíveis a concentrações de O₂ (LASTELLA, 2002; TCHOBANOGLIOUS; THEISEN; VIGIL, 1993).

2.1.2 Parâmetros operacionais

Vários parâmetros operacionais influenciam o desempenho da digestão anaeróbia, incluindo a temperatura, o pH, a concentração de sólidos totais e voláteis, a taxa de alimentação, a relação carbono/nitrogênio, entre outros. A temperatura é um dos fatores mais críticos, pois influencia a atividade dos microrganismos e a cinética das reações bioquímicas. A faixa de temperatura ótima varia de acordo com o tipo de microrganismo predominante, geralmente entre 25°C e 55°C (DEMIREL e SCHERER, 2008).

O tipo e a composição dos substratos orgânicos influenciam diretamente a eficiência da digestão anaeróbia. Substratos ricos em carboidratos, lipídios e proteínas são mais facilmente degradados e resultam em maior produção de biogás em comparação com substratos fibrosos, como resíduos lignocelulósicos. A co-digestão de diferentes tipos de substratos pode melhorar a estabilidade do processo e aumentar a produção de biogás (RAPOSO et al., 2011).

O monitoramento e o controle adequados do processo de digestão anaeróbia são essenciais para garantir sua estabilidade e eficiência. Isso envolve a análise regular dos parâmetros operacionais, a detecção precoce de possíveis problemas, como acidificação excessiva ou inibição do processo, e a implementação de estratégias de controle, como ajustes na taxa de alimentação ou na composição do substrato (DHULL et al., 2024).

2.2 Fatores que Influenciam na Digestão Anaeróbia

2.2.1 Temperatura

A temperatura é um dos fatores mais críticos que influenciam o desempenho da digestão anaeróbica. O controle adequado da temperatura é essencial para otimizar a atividade dos microrganismos envolvidos no processo e maximizar a produção de biogás.

A temperatura afeta diretamente a velocidade das reações bioquímicas que ocorrem durante a digestão anaeróbica. A cinética das reações de hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese é fortemente dependente da temperatura, com taxas de reação aumentando significativamente em temperaturas mais elevadas. Geralmente, a faixa de temperatura ótima para a digestão anaeróbica situa-se entre 25°C e 55°C, com variações dependendo dos microrganismos presentes e do tipo de substrato utilizado (CHEN et al., 2008).

A composição do biogás produzido durante a digestão anaeróbica varia com a temperatura do processo. Em temperaturas mais baixas, predominam os microrganismos metanogênicos acetoclásticos, que produzem metano a partir de acetato. Em contraste, em temperaturas mais elevadas, os microrganismos metanogênicos hidrogênicos se tornam mais predominantes, resultando em uma maior proporção de metano na composição do biogás (YENIGÜN & DEMIREL, 2013).

A estabilidade do processo de digestão anaeróbica é influenciada pela temperatura do sistema. Temperaturas muito baixas podem retardar a atividade dos microrganismos, levando a uma digestão incompleta e à acumulação de metabólitos tóxicos, como ácidos graxos voláteis. Por outro lado, temperaturas muito altas podem causar inibição dos microrganismos e perda de atividade metabólica, resultando em uma diminuição na produção de biogás e na deterioração do processo (DEMIREL, 2014).

O controle preciso da temperatura durante a digestão anaeróbica é essencial para garantir a eficiência e a estabilidade do processo. Isso pode ser alcançado por meio de estratégias de controle de temperatura, como o uso de sistemas de aquecimento ou resfriamento, isolamento térmico dos reatores e monitoramento regular da temperatura do sistema (HAO et al., 2015).

2.2.2 Potencial hidrogeniônico - pH

O potencial hidrogeniônico, representado pelo pH, desempenha um papel fundamental no processo de digestão anaeróbica. O controle adequado do pH é essencial para manter a estabilidade do processo e otimizar a atividade dos microrganismos envolvidos na degradação da matéria orgânica.

O pH afeta diretamente a atividade dos microrganismos presentes no processo de digestão anaeróbica. A faixa de pH adequada varia dependendo do tipo de microrganismo envolvido, mas geralmente situa-se entre 6,5 e 8,5. Valores de pH fora dessa faixa podem inibir a atividade microbiana e comprometer a eficiência do processo. Microrganismos acidogênicos e metanogênicos são particularmente sensíveis a variações no pH, com valores extremos podendo levar à inibição do crescimento celular e à supressão da atividade metabólica (ANGELIDAKI et al., 2009).

O pH também influencia a composição do biogás produzido durante a digestão anaeróbica. Em condições de pH neutro a ligeiramente alcalino, a produção de metano é favorecida, resultando em uma maior proporção de metano na composição do biogás. Por outro lado, em condições de pH ácido, a produção de ácidos graxos voláteis é predominante, levando a uma redução na proporção de metano e a uma diminuição na eficiência do processo (DEMIREL & SCHERER, 2008).

A estabilidade do processo de digestão anaeróbica é influenciada pelo pH do sistema. Valores de pH inadequados podem levar a distúrbios no equilíbrio microbiano e a mudanças na composição da comunidade microbiana, resultando em flutuações na produção de biogás e na deterioração do processo. O monitoramento regular do pH e a implementação de estratégias de controle são essenciais para manter a estabilidade do processo ao longo do tempo (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

O controle preciso do pH durante a digestão anaeróbica é um desafio, especialmente em sistemas de grande escala. Estratégias de controle, como a adição de agentes tamponantes ou a recirculação de efluentes alcalinos, podem ser utilizadas para manter o pH dentro da faixa ideal (AMANI et al., 2017).

2.2.3 Relação carbono-nitrogênio (C/N)

A relação carbono/nitrogênio (C/N) é outro parâmetro importante que influencia significativamente o desempenho do processo de digestão anaeróbica. O equilíbrio adequado entre carbono e nitrogênio é essencial para promover a atividade microbiana, otimizar a degradação da matéria orgânica e maximizar a produção de biogás.

A relação C/N afeta diretamente a composição e a atividade da comunidade microbiana presente no processo de digestão anaeróbica. Microrganismos heterotróficos, responsáveis pela hidrólise e fermentação da matéria orgânica, requerem uma fonte adequada de carbono para crescer e se reproduzir. Por outro lado, microrganismos autotróficos, como as bactérias redutoras de nitrato e as arqueias metanogênicas, dependem de fontes de nitrogênio para sua atividade metabólica. Uma relação C/N desequilibrada pode resultar em competição por nutrientes entre os diferentes grupos microbianos e comprometer a eficiência do processo (SLEAT et al., 2019).

Com relação a cinética das reações bioquímicas, a relação C/N influencia a velocidade das reações bioquímicas que ocorrem durante a digestão anaeróbica. Em condições de alta relação C/N, onde o carbono está em excesso em relação ao nitrogênio, a degradação da matéria orgânica pode ser limitada pela disponibilidade de nitrogênio, resultando em uma digestão incompleta e na acumulação de metabólitos intermediários, como ácidos graxos voláteis. Por outro lado, em condições de baixa relação C/N, onde o nitrogênio está em excesso em relação ao carbono, pode ocorrer uma inibição da atividade microbiana devido à toxicidade dos metabólitos nitrogenados, como amônia e nitritos (WANG et al., 2020).

A relação C/N também influencia a qualidade do biogás produzido durante a digestão anaeróbica. Em condições de alta relação C/N, a proporção de metano na composição do biogás tende a ser mais elevada, devido à predominância de substratos carbonáceos de alta qualidade que favorecem a produção de metano. Por outro lado, em condições de baixa relação C/N, a produção de biogás pode ser prejudicada devido à falta de substratos carbonáceos disponíveis para os microrganismos metanogênicos, resultando em uma menor proporção de metano e em uma redução na eficiência do processo (ZHANG et al., 2019).

O controle preciso da relação C/N durante a digestão anaeróbica é essencial para garantir a eficiência e a estabilidade do processo. Estratégias de gestão, como a co-digestão de diferentes tipos de substratos orgânicos com diferentes relações C/N, podem ser utilizadas para otimizar a relação C/N do substrato e promover uma digestão mais eficiente (CHEN et al., 2021).

No caso da co-digestão de RSUO e esterco suíno na proporção de 1:1, Regazi et al. (2021) afirma que relação C/N ideal para a produção de biogás deve ficar entre 18 e 24.

2.2.4 Taxa de carregamento orgânico - TCO

A taxa de carregamento orgânico (TCO) é outro parâmetro crítico no processo de digestão anaeróbica, influenciando diretamente a eficiência e o desempenho do sistema. A TCO se refere à quantidade de matéria orgânica alimentada ao sistema por unidade de tempo, e seu controle adequado é essencial para otimizar a produção de biogás e garantir a estabilidade do processo.

A TCO afeta diretamente a taxa na qual a matéria orgânica é degradada pelos microrganismos no processo de digestão anaeróbica. Em geral, um aumento na TCO resulta em uma maior taxa de degradação da matéria orgânica, pois mais substrato está disponível para os microrganismos. No entanto, em níveis muito elevados de TCO, a capacidade dos microrganismos para degradar o substrato pode ser limitada, levando à acumulação de matéria orgânica não degradada no sistema e à redução da eficiência do processo (LIU et al., 2019).

A TCO também influencia a produção de biogás durante a digestão anaeróbica. Em geral, um aumento na TCO resulta em uma maior produção de biogás, pois mais substrato orgânico está disponível para os microrganismos metanogênicos. No entanto, em níveis muito elevados de TCO, a produção de biogás pode ser comprometida devido à acumulação de ácidos graxos voláteis e outros metabólitos tóxicos, que podem inibir a atividade microbiana e prejudicar o processo (BATSTONE et al., 2015).

Além disso, a TCO também influencia a formação de metabólitos indesejados durante a digestão anaeróbica. Em condições de TCO elevada, pode ocorrer uma acumulação de ácidos graxos voláteis, amônia e outros metabólitos tóxicos, que podem inibir a atividade microbiana e prejudicar a eficiência do processo. Além disso, níveis muito baixos de TCO podem resultar em uma produção insuficiente de ácidos graxos voláteis, o que pode comprometer a estabilidade do processo e a produção de biogás (LIU et al., 2018).

O controle preciso da TCO durante a digestão anaeróbica é essencial para garantir a eficiência e a estabilidade do processo. Estratégias de gestão, como o ajuste da taxa de alimentação de substrato e a implementação de sistemas de controle de processo, podem ser utilizadas para otimizar a TCO e promover uma digestão mais eficiente (ANGELIDAKI & ELLEGAARD, 2003).

2.2.5 Tempo de retenção hidráulica - TRH

Assim como os demais parâmetros, o tempo de retenção hidráulica (TRH) é um dos parâmetros fundamentais no projeto e operação de sistemas de digestão anaeróbica, influenciando diretamente a eficiência e o desempenho do processo. O TRH representa o tempo médio que o substrato orgânico permanece no reator durante o processo de digestão, e seu controle adequado é essencial para garantir a estabilidade do sistema e a maximização da produção de biogás.

O TRH desempenha um papel fundamental na determinação da taxa de degradação da matéria orgânica durante o processo de digestão anaeróbica. Em geral, um TRH mais longo permite uma maior interação entre os microrganismos e o substrato orgânico, resultando em uma maior taxa de degradação. No entanto, em TRH muito curtos, pode ocorrer uma digestão incompleta da matéria orgânica devido à limitação do tempo disponível para os microrganismos realizarem as reações bioquímicas necessárias (ZHANG et al., 2015).

O TRH tem influência direta na composição do biogás produzido durante a digestão anaeróbica. Em TRH mais longos, a produção de metano tende a ser favorecida, resultando em uma maior proporção de metano na composição do biogás. Isso ocorre devido ao tempo prolongado disponível para os microrganismos metanogênicos converterem os produtos intermediários da digestão em metano. Por outro lado, em TRH mais curtos, a produção de

metano pode ser comprometida, levando a uma menor eficiência do processo (JIANG et al., 2018).

A estabilidade do processo de digestão anaeróbica é influenciada pelo TRH do sistema. TRH muito curtos podem resultar em flutuações na acidez do reator e na acumulação de metabólitos tóxicos, como ácidos graxos voláteis, que podem inibir a atividade microbiana e prejudicar a eficiência do processo. Por outro lado, TRH muito longos podem resultar em uma menor resistência do sistema a perturbações externas e uma maior sensibilidade a variações nas condições operacionais (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

O controle preciso do TRH durante a digestão anaeróbica é essencial para garantir a eficiência e a estabilidade do processo. Estratégias de gestão, como o ajuste da taxa de alimentação de substrato e a otimização do volume do reator, podem ser utilizadas para controlar o TRH e promover uma digestão mais eficiente (AMON et al., 2006).

2.3 Reatores Anaeróbicos

Os reatores anaeróbicos são sistemas projetados para fornecer condições ideais para o crescimento e atividade dos microrganismos anaeróbios responsáveis pela degradação da matéria orgânica e produção de biogás (LETTINGA et al., 2001).

Os reatores anaeróbicos oferecem várias vantagens, incluindo baixo consumo de energia, produção de biogás renovável e redução do volume de resíduos orgânicos. No entanto, eles também enfrentam desafios, como a necessidade de controle preciso das condições operacionais, a formação de incrustações e entupimentos, e a susceptibilidade a choques de carga e variações sazonais.

Existem vários tipos de reatores anaeróbicos, cada um com características específicas que influenciam seu desempenho, eficiência e aplicabilidade em diferentes contextos.

2.3.1 Reator de fluxo contínuo (CSTR)

O reator de fluxo contínuo, ou CSTR (Continuous Stirred Tank Reactor), é um dos tipos mais comuns de reatores anaeróbicos. Neste sistema, o substrato orgânico é continuamente alimentado no reator, enquanto o efluente é retirado de forma contínua. O CSTR é caracterizado pela mistura completa do substrato e pela manutenção de condições homogêneas em todo o reator. Isso permite uma alta eficiência na remoção de matéria orgânica e produção de biogás (LETTINGA et al., 2001).

2.3.2 Reator de leito fixo (UASB)

O reator de leito fixo, ou UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket), é projetado com uma biomassa suspensa em meio granular ou floculento. O substrato orgânico flui de baixo para cima através do leito de biomassa, permitindo a formação de um manto de lodo anaeróbico que serve como meio de reação. O UASB é amplamente utilizado para o tratamento de efluentes de alta carga orgânica em diversas aplicações, incluindo tratamento de esgoto doméstico e industrial (CHERNICHARO, 2007).

2.3.3 Reator de leito expandido (EGSB)

Similar ao UASB, o reator de leito expandido, ou EGSB (*Expanded Granular Sludge Bed*), é projetado para tratar efluentes de alta carga orgânica. No entanto, o reator EGSB possui uma estrutura de leito granular expandido, o que permite uma maior taxa de carga orgânica e eficiência de remoção de poluentes em comparação com o UASB. O EGSB é

especialmente adequado para aplicações com elevada concentração de sólidos suspensos (RAJESHWARI et al., 2000).

2.3.4 Reator de manto de lodo (ASBR)

O reator de manto de lodo ou ASBR (*Anaerobic Sequencing Batch Reactor*), opera em ciclos sequenciais nos quais as fases de enchimento, reação, sedimentação e descarga ocorrem em um único tanque. O ASBR oferece flexibilidade operacional e pode ser adaptado para uma variedade de aplicações e condições operacionais, tornando-o uma escolha versátil para o tratamento de resíduos orgânicos (BATSTONE et al., 2002).

2.4 Tratamento do Esterco Suíno em Granjas

A suinocultura é considerada uma atividade de potencial altamente poluente ao meio ambiente, tanto para a contaminação d'água e do solo, decorrentes do manejo inadequado de seus resíduos, quanto a poluição atmosférica, provocada pelos gases gerados, principalmente os Gases de Efeito Estufa (GEE), pois os sistemas de produção e manejo de dejetos de suínos sejam fontes de emissão de uma expressiva quantidade de gases (NOGUEIRA e SILVA, 2006).

Os dejetos suínos são compostos pelas fezes, urina, restos de ração e água que são gerados na atividade da suinocultura apresentando um potencial poluidor para o ambiente devido a grande quantidade de matéria orgânica que é eliminada nas granjas (BALOTA; MACHINESKI; MATOS, 2012).

A poluição causada pelos dejetos suínos no meio ambiente pode-se apresentar de diferentes formas por suas características químicas, causando diferentes danos ambientais. Os efluentes, além de contaminar recursos hídricos, compromete o solo, sendo o nitrogênio, fósforo, zinco e o cobre os principais responsáveis pela contaminação (SARDÁ et al., 2010).

Além disso, a decomposição não controlada dos resíduos prejudica o bem-estar e a saúde humana dos suinocultores e da população próxima das propriedades rurais, pois incide em aumento de bactérias, proliferação de moscas, sendo que todo o processo de degradação gera gases como amônia, carbonato de amônia, dióxido de carbono entre outros elementos que causam o aquecimento global, pela emissão dos gases do efeito estufa (ITO; GUIMARÃES; AMARAL, 2016).

A geração e emissão de GEE por suínos está relacionada ao confinamento dos animais, armazenagem de efluentes, tratamento de efluentes e aplicação no solo. O Brasil se comprometeu com metas para mitigação das emissões antropogênicas de GEE e umas das principais estratégias é a atuação sobre as emissões em todo o setor pecuário (MITO et al., 2018).

Após coletado, o dejetos suíno necessita ser estabilizado, para posterior aproveitamento do potencial fertilizante, ou tratado, para atingir padrões de lançamento em corpos hídricos. A estabilização pode ocorrer em lagoas sequenciais ou biodigestores.

Os sistemas de lagoas de estabilização constituem-se em uma forma simples para o tratamento de dejetos de suínos e vêm sendo estudados como alternativas de baixo custo e que não requerem maiores cuidados operacionais. Esse sistema de tratamento é indicado principalmente para regiões de clima quente e possui eficiência na remoção de DBO superior a 85% (VIVAN et al., 2010). No entanto, as lagoas de estabilização não evitam a emissão de GEE.

O tratamento dos dejetos suínos com a utilização de biodigestores é uma tecnologia já conhecida e utilizada no Brasil. A possibilidade do aproveitamento desse resíduo para

produção de biogás e biofertilizante, associada à mitigação dos impactos ambientais, é o que torna a tecnologia interessante.

O Biodigestor de Lagoa Coberta - BLC é a tecnologia de reator mais adotada no Brasil para o tratamento de dejetos da suinocultura, fato que muito se deve à facilidade na sua operação e menor custo de implantação e manejo comparada as outras tecnologias. Ainda, trata-se de uma tecnologia versátil que pode ser implementada tanto em grandes quanto em pequenas propriedades rurais (CANTRELL et al., 2008).

O biogás proveniente de biodigestores de granjas suínas é em sua grande maioria utilizado na geração de energia elétrica. Para a geração de energia elétrica, é necessário que haja a combustão do biogás e sua transformação em energia mecânica. Desta forma, o gerador é acionado e então é produzida a energia elétrica (TANG et al., 2021).

2.5 Caracterização do Biogás a partir de Esterco Suíno In Natura

O esterco suíno é uma fonte valiosa de matéria orgânica para a produção de biogás por meio da digestão anaeróbica. O esterco suíno é uma mistura complexa de matéria orgânica, composta principalmente de excrementos de suínos, água, restos de ração e resíduos de cama. Possui uma alta concentração de matéria orgânica facilmente degradável, tornando-o um substrato ideal para a produção de biogás (APPELS et al., 2011).

O esterco suíno possui um alto potencial de produção de biogás devido à sua composição rica em matéria orgânica e microrganismos anaeróbios. Estudos têm demonstrado que a digestão anaeróbica do esterco suíno pode resultar em altas taxas de produção de biogás, com teores de metano superiores a 70% em volume (DADASER-CELIK, AZGIN e YILDIZ, 2016).

As bactérias presentes no esterco suíno desempenham um papel fundamental no processo de digestão anaeróbica e na produção de biogás. As bactérias metanogênicas são responsáveis pela etapa final da digestão anaeróbica, na qual os produtos intermediários da degradação da matéria orgânica são convertidos em metano e dióxido de carbono. Essas bactérias pertencem ao filo Euryarchaeota e incluem várias espécies, como *Methanobacterium*, *Methanosarcina* e *Methanosaeta* (ANGELIDAKI & SANDERS, 2004).

Antes da ação das bactérias metanogênicas, ocorrem etapas preliminares de hidrólise, acidogênese e acetogênese, onde os polímeros complexos são quebrados em compostos orgânicos simples, como ácidos graxos voláteis (AGVs), acetato e hidrogênio. Esses processos são realizados por diferentes grupos de bactérias, incluindo bactérias hidrolíticas, acidogênicas e acetogênicas, como *Clostridium*, *Bacteroides* e *Syntrophomonas* (ZINDER, 1993).

As bactérias presentes no esterco suíno desempenham papéis específicos e complementares no processo de digestão anaeróbica. Enquanto algumas bactérias quebram compostos complexos em substratos mais simples, outras convertem esses substratos em produtos intermediários, como AGVs e acetato, que servem como substrato para as bactérias metanogênicas. Portanto, a diversidade e a atividade das comunidades microbianas no esterco suíno são cruciais para a eficiência e a estabilidade da produção de biogás (HAO et al., 2015). Além disso, Tortora et al. (2017) afirma que essas bactérias podem suportar temperaturas até 70°C.

A composição do biogás proveniente da digestão anaeróbica do esterco varia em função de fatores como a qualidade do substrato, temperatura, tempo de retenção e condições operacionais do biodigestor. Em média, o biogás apresenta os seguintes componentes:

- Metano (CH₄): Variando entre 55% e 70%, o metano é o principal componente energético do biogás. Sua concentração depende diretamente do equilíbrio entre os processos acidogênico e metanogênico na digestão (MATA-ALVAREZ et al., 2014);
- Dióxido de Carbono (CO₂): Com proporção de 30% a 40%, o CO₂ é produzido durante a manipulação de carboidratos e proteínas (CHEN et al., 2021);
- Sulfeto de Hidrogênio (H₂S): Embora presente em concentrações menores (tipicamente entre 0,05% e 1%), o H₂S representa um desafio técnico e ambiental devido ao seu potencial corrosivo e odor desagradável (LI, 2022);
- Traços de Amônia (NH₃) e Nitrogênio (N₂): São subprodutos que influenciam a qualidade do biogás, especialmente no contexto de emissões e manejo do digestato (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

O poder calorífico do biogás é determinado pela concentração de metano, com valores médios variando entre 20 e 25 MJ/m³. A eficiência energética do processo depende da adequação do biodigestor, sendo os sistemas de fluxo contínuo mais indicados para substratos líquidos, como o esterco suíno. Além disso, a adição de co-substratos ricos em carbono, como resíduos alimentícios, pode melhorar a relação C/N, otimizando a produção de biogás (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

Assim como qualquer outro substrato, a produção de biogás a partir do esterco suíno é influenciada por uma série de parâmetros físicos, químicos e operacionais:

- Temperatura: A digestão pode ocorrer em condições mesofílicas (30–40°C) ou termofílicas (50–60°C). A temperatura ideal varia conforme o tipo de biodigestor, sendo que as condições termofílicas tendem a acelerar o processo, mas é necessário maior controle térmico;
- pH e Alcalinidade: O pH ideal para a metanogênese situa-se entre 6,5 e 7,5. Flutuações fora dessa faixa podem inibir os microrganismos metanogênicos;
- Tempo de Retenção Hidráulica (TRH): O TRH varia entre 15 e 40 dias, dependendo do sistema e do volume de substrato, influenciando diretamente a eficiência de conversão;
- Relação Carbono/Nitrogênio (C/N): Uma relação C/N equilibrada (entre 20 e 30:1) é crucial para evitar acúmulo de amônia ou ácidos voláteis (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

O uso do esterco suíno na produção de biogás contribui para a mitigação de impactos ambientais, como a emissão de gases de efeito estufa (GEE) e a contaminação de corpos hídricos. O metano capturado no biogás substitui combustíveis fósseis, enquanto o digerido remanescente pode ser utilizado como fertilizante, fechando o ciclo de nutrientes.

2.6 Caracterização do Biogás a partir de RSOU

O aproveitamento de resíduos sólidos orgânicos urbanos (RSOU) para a produção de biogás por meio da digestão anaeróbica tem recebido crescente atenção devido aos seus potenciais benefícios ambientais e energéticos.

Os RSOU são compostos principalmente por materiais biodegradáveis, como restos de alimentos, resíduos de jardins, e resíduos orgânicos provenientes de domicílios, restaurantes e

mercados. Devido à sua alta biodegradabilidade, os RSOU apresentam um potencial significativo para a produção de biogás por meio de processos de digestão anaeróbica (MATA-ALVAREZ et al., 2014).

O biogás gerado a partir da digestão anaeróbica dos RSOU apresenta uma composição que pode variar dependendo de diversos fatores, como a composição dos resíduos alimentados ao processo, o tipo de reator utilizado, as condições operacionais e as características do ambiente de digestão (LI, 2022).

No entanto, estudos têm demonstrado que o teor de metano no biogás pode variar amplamente, geralmente entre 40% e 60%, dependendo das condições do processo. Essa faixa percentual de concentração de metano no biogás classifica-o como um biogás de baixa qualidade, pois possui baixo teor energético (ANGELIDAKI et al., 2018).

A digestão anaeróbica de resíduos sólidos urbanos representa uma solução promissora e sustentável para a gestão dos resíduos e a produção de energia renovável. Porém, de uma forma geral, o biogás proveniente desse substrato é considerado de baixa qualidade, requerendo que seja purificado para poder comercializá-lo.

2.7 Caracterização do Biogás a partir da Co-Digestão de RSOU e Esterco Suíno In Natura

A produção de biogás a partir da co-digestão de RSOU e esterco suíno in natura é uma abordagem sustentável para o gerenciamento de resíduos e a geração de energia renovável. Este processo envolve a conversão anaeróbia (sem oxigênio) de matéria orgânica, que resulta na produção de biogás, composto principalmente por metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), e um subproduto chamado digestato, rico em nutrientes e que pode ser utilizado como fertilizante (SHEN et al., 2019).

A escolha do RSOU e do esterco suíno in natura se dá pelas suas propriedades sinérgicas:

- RSOU: é rico em carbono devido à alta presença de material orgânico (resíduos alimentares, restos de plantas etc.), mas pode apresentar um desequilíbrio na relação C/N (muito carbono em relação ao nitrogênio), o que pode reduzir a eficiência da digestão anaeróbia e levar à formação de ácidos que inibem o processo de metanogênese.
- Esterco Suíno: contém alto teor de nitrogênio e umidade, complementando o RSOU. Sua inclusão melhora a relação C/N do substrato, aumentando a eficiência da produção de biogás. Além disso, o esterco contém populações microbianas já adaptadas à digestão anaeróbia, o que pode acelerar o início do processo (MURTO, BJÖRNSSON e MATTIASSON, 2004).

A combinação de RSOU e esterco suíno na digestão anaeróbia apresenta diversas vantagens:

- Melhoria da eficiência na produção de biogás: a combinação adequada de resíduos ricos em carbono (RSOU) e nitrogênio (esterco suíno) cria um ambiente mais favorável para a ação das bactérias metanogênicas. A relação C/N ideal para a digestão anaeróbia varia entre 18:1 e 30:1, e a co-digestão pode aproximar o substrato dessa faixa (OFON et al., 2024);

- Aumento da estabilidade do processo: a co-digestão de diferentes tipos de resíduos dilui compostos tóxicos que poderiam inibir a digestão anaeróbia, como amônia e ácidos graxos voláteis, que podem estar presentes em concentrações elevadas no esterco suíno. Assim, a co-digestão estabiliza o processo, permitindo uma produção de biogás mais constante (OFON et al., 2024);
- Maior produção de biogás: estudos indicam que a co-digestão pode aumentar a produção de biogás em até 50% em comparação com a digestão isolada dos substratos, devido à maior disponibilidade de matéria orgânica facilmente degradável e à sinergia entre os diferentes componentes (MURTO, BJÖRNSSON e MATTIASSON, 2004);
- Tratamento mais eficiente de resíduos: a co-digestão possibilita a gestão simultânea de resíduos orgânicos urbanos e dejetos animais, reduzindo a necessidade de espaço para aterros sanitários e a emissão de gases de efeito estufa (GEE), como o metano, que seria liberado no ambiente se esses resíduos fossem dispostos de forma inadequada (MURTO, BJÖRNSSON e MATTIASSON, 2004).

Do ponto de vista econômico, a produção de biogás pode se tornar uma fonte de receita através da venda de energia, créditos de carbono e fertilizantes. Além disso, reduz os custos associados à disposição de resíduos e o tratamento de dejetos suínos, representando uma solução viável para fazendas suinícolas e cidades que precisam gerenciar grandes quantidades de RSOU (SHEN et al., 2019).

A Tabela 1 compara as características do biogás proveniente da co-digestão do esterco suíno in natura com RSOU com o biogás proveniente da digestão anaeróbica do esterco suíno isolado e com o biogás oriundo da digestão anaeróbica de RSOU. Pode-se destacar a variação no poder calorífico e as implicações para o uso energético, purificação e eficiência da digestão anaeróbica.

A co-digestão de RSOU e esterco suíno in natura representa uma abordagem promissora para a valorização de resíduos, promovendo a produção de energia renovável e o gerenciamento sustentável de resíduos orgânicos. Contudo, o sucesso do processo depende de uma boa compreensão da dinâmica da digestão anaeróbia, da otimização dos parâmetros operacionais e do gerenciamento dos desafios técnicos inerentes à variabilidade dos substratos. A implementação de biodigestores para esse fim pode contribuir significativamente para a economia circular e a redução da pegada de carbono.

Tabela 1. Comparação das características do biogás proveniente da co-digestão do esterco suíno in natura com RSOU com o biogás proveniente da digestão anaeróbica do esterco suíno isolado e com o biogás oriundo da digestão anaeróbica de RSOU.

Característica	Biogás de Esterco Suíno	Biogás de RSOU	Biogás da Co-Digestão (Esterco Suíno + RSOU)
Poder Calorífico	22 a 28 MJ/m ³	18 a 25 MJ/m ³	20 a 27 MJ/m ³
Teor de Metano	55 a 80 %	40 a 60 %	55 a 80 %
Teor de Dióxido de Carbono	20 a 45 %	40 a 60 %	20 a 45 %
Contaminantes Principais	H ₂ S, Amônia, COVs	H ₂ S, Amônia, COVs	H ₂ S, Amônia, COVs

Continua...

Continuação da Tabela 1.

Característica	Biogás de Esterco Suíno	Biogás de RSOU	Biogás da Co-Digestão (Esterco Suíno + RSOU)
Impacto dos Contaminantes	Corrosão em equipamentos, necessidade de purificação	Necessita de purificação para reduzir emissões e melhorar a qualidade do biogás	Menor impacto devido à combinação das fontes, mas ainda requer purificação
Eficiência de Produção de Metano	Alta (devido ao alto teor de compostos biodegradáveis)	Moderada (devido à diversidade de resíduos)	Alta (melhoria na conversão de resíduos orgânicos)
Uso Energético (Aplicações)	Geração de eletricidade, calor e biocombustíveis para veículos	Geração de eletricidade e calor, mas com maior necessidade de purificação	Geração de eletricidade e calor, mais eficiente na produção de metano e com menor necessidade de purificação
Fontes de Matéria Orgânica	Esterco suíno com alta concentração de matéria orgânica biodegradável	Restos de alimentos, resíduos de jardinagem, papel e outros tipos de resíduos orgânicos urbanos	Mistura de estercos suínos (rica em compostos biodegradáveis) com resíduos orgânicos urbanos (diversificados e mais difíceis de digerir)
Vantagens	Maior poder calorífico, produção mais eficiente de metano	Gestão eficiente de resíduos urbanos, contribuição para a economia circular	Melhoria na produção de metano devido à sinergia entre esterco e RSOU, maior eficiência energética
Desvantagens	Maior concentração de contaminantes, exigindo purificação	Menor poder calorífico, maior variabilidade na composição do biogás	Necessidade de gestão adequada da mistura de resíduos para otimizar o processo de digestão

Fonte: Adaptado de Tchobanoglous et al (1993); Ibro et al (2022); Li (2022) e Murto et al (2004).

2.8 Processo de Secagem por Aspersão (*Spray Drying*)

O processo de secagem por aspersão envolve a atomização do líquido em pequenas gotas que são então expostas a um fluxo de ar quente, resultando na evaporação rápida do solvente e na formação de partículas sólidas. Ele baseia-se em princípios físicos e termodinâmicos bem estabelecidos. A atomização do líquido em gotículas finas aumenta significativamente a área de superfície disponível para a transferência de massa, facilitando assim a evaporação do solvente. Além disso, o fluxo de ar quente fornece a energia necessária para promover a vaporização do líquido, resultando na formação de partículas sólidas (MASTERS, 2019).

Vários parâmetros influenciam o desempenho e a eficiência do processo de secagem por aspersão, incluindo a temperatura do ar de secagem, a taxa de alimentação do líquido, a viscosidade do fluido de alimentação, a velocidade de atomização e a geometria do secador. O entendimento desses parâmetros e sua otimização são essenciais para garantir a produção de pós com as características desejadas (MUJUMDAR, 2014).

A secagem por aspersão é amplamente utilizada em uma variedade de indústrias, incluindo alimentos, farmacêutica, química e de materiais. Na indústria alimentícia, por exemplo, o processo é empregado na produção de leite em pó, café solúvel, aromas, entre

outros produtos. Na indústria farmacêutica, é utilizado para a produção de medicamentos em pó, como antibióticos e vitaminas (CHEN et al., 2019).

A velocidade de secagem por meio do processo de aspersão é significativamente mais rápida do que a secagem em estufa, por exemplo. Os fatores que levam a uma secagem mais rápida são:

- Transferência de Massa Eficiente: no processo de *spray drying*, o líquido é atomizado em pequenas gotículas, aumentando enormemente a área de superfície disponível para a evaporação. Isso resulta em uma transferência de massa muito mais eficiente em comparação com a secagem em estufa, onde o líquido está presente em sua forma original ou em camadas relativamente espessas (MASTERS, 2019).
- Temperatura Controlada: no processo de *spray drying*, a temperatura do ar de secagem pode ser controlada com precisão e ajustada para otimizar a velocidade de secagem, enquanto na secagem em estufa, a temperatura ambiente ou a temperatura do forno podem não ser ideais para a secagem rápida e eficiente, dependendo do material (MASTERS, 2019).
- Tempo de Residência Reduzido: no processo de *spray drying*, as partículas secas são removidas rapidamente da câmara de secagem, minimizando o tempo de residência e, portanto, reduzindo o risco de super-secagem ou degradação do produto (MUJUMDAR, 2014). Na secagem em estufa, o material pode permanecer por períodos mais longos, o que pode levar a uma secagem menos uniforme ou a danos ao produto.
- Efeito de Transporte de Calor e Massa: o processo de *spray drying* permite um excelente transporte de calor e massa devido à rápida dispersão das gotículas de líquido na corrente de ar quente. Isso promove uma secagem mais uniforme e eficiente em comparação com a secagem em estufa, onde o transporte de calor e massa pode ser mais limitado, especialmente em materiais de maior viscosidade ou espessura (MASTERS, 2019).

A faixa de temperatura operacional de um *spray dryer* (equipamento de secagem por aspersão) pode variar de cerca de 40°C a 300°C para o ar de entrada, com a temperatura do ar de saída geralmente sendo mais baixa.

O processo de *spray drying* pode ser descrito por três fases principais: atomização, conversão de gotículas em partículas; e coleta de partículas), embora alguns autores usem quatro ou cinco etapas menores para descrevê-lo em mais detalhes (ANANDHARAMAKRISHNAN e ISHWARYA, 2015; PATEL et al., 2009; NANDIYANTO e OKUYAMA, 2011). Conforme mostrado na figura 2, uma solução é bombeada para um atomizador, quebrando a alimentação líquida em um spray de gotículas finas. Em seguida, as gotículas são ejetadas em uma câmara de gás de secagem onde ocorre a vaporização da umidade, resultando na formação de partículas secas. Finalmente, usando um dispositivo apropriado, as partículas secas são separadas do meio de secagem, sendo então coletadas em um tanque.

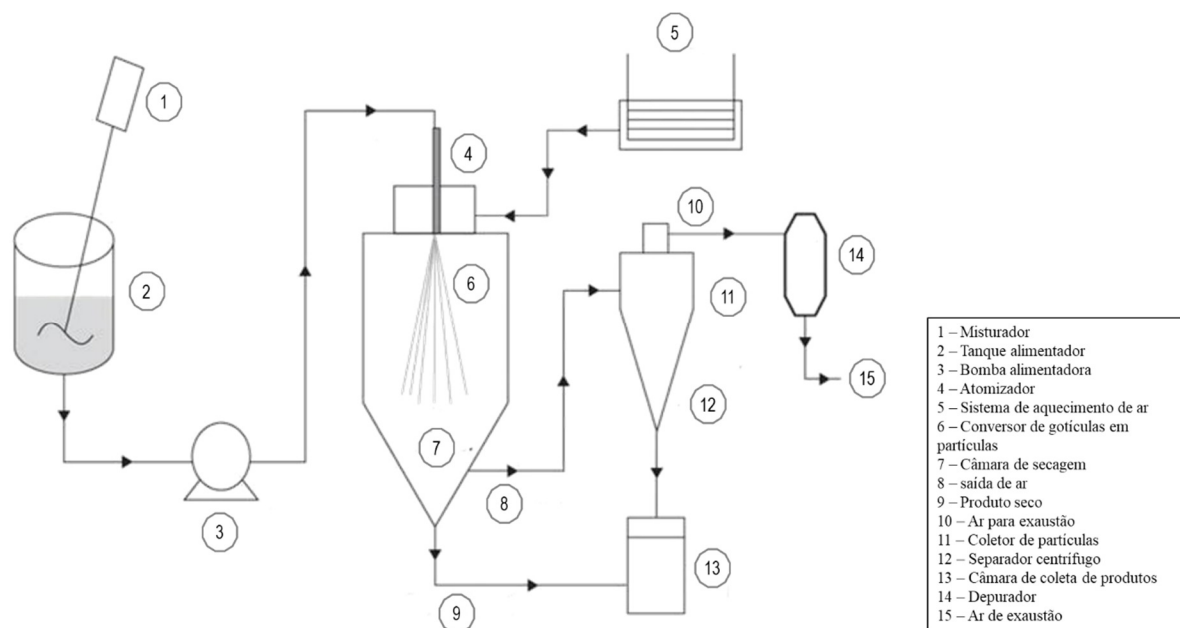


Figura 2. Representação esquemática do processo de secagem por spray dryer. Fonte: Adaptado de Anandharamakrishnan e Ishwarya (2015) e Anandharamakrishnan (2017).

Não há histórico na literatura de pesquisas que realizam a secagem, por spray dryer, de esterco suíno, ou qualquer outro composto orgânico, que tenha como objetivo o uso como inóculo para processo de biodigestão anaeróbica.

2.9 Análise Econômica

A análise de investimentos se utiliza de ferramentas essenciais para avaliar a viabilidade econômica de projetos e tomar decisões estratégicas sobre a alocação de recursos financeiros. O fluxo de caixa descontado (FCD) é uma técnica fundamental na análise de investimentos, utilizada para avaliar o investimento a ser realizado em um projeto.

O FCD é uma abordagem que consiste em projetar os fluxos de caixa futuros esperados de um investimento, descontá-los a uma taxa de retorno adequada e calcular o valor presente líquido (VPL) desses fluxos de caixa (ROSS et al., 2016).

A taxa mínima de atratividade (TMA) é a taxa de retorno mínima que um investimento deve gerar para ser considerado atraente ou viável para um investidor. Também conhecida como taxa de desconto ou custo de capital, a TMA reflete o custo de oportunidade dos fundos investidos e o risco associado ao projeto de investimento (BREALEY et al., 2017). A determinação da taxa mínima de atratividade é um processo complexo e envolve considerações sobre o custo de capital próprio e de terceiros, o risco do projeto, a taxa de inflação, entre outros fatores. Geralmente, a TMA é baseada no custo médio ponderado de capital (WACC) da empresa ou no retorno esperado pelo investidor, levando em conta sua aversão ao risco (GITMAN e ZUTTER, 2019).

A TMA é uma informação fundamental na análise de fluxo de caixa descontado (FCD), onde os fluxos de caixa futuros esperados são descontados a essa taxa para calcular o valor presente líquido (VPL) do projeto (ROSS et al., 2016).

O FCD é amplamente utilizado em análises de investimentos em diversos setores, incluindo finanças corporativas, avaliação de empresas, fusões e aquisições, projetos de infraestrutura, entre outros. Ele permite aos gestores avaliarem a viabilidade financeira de um

investimento, considerando tanto os fluxos de entrada quanto os de saída de caixa ao longo da vida útil do projeto (BREALEY, MYERS e ALLEN, 2017).

Os principais indicadores para verificar a viabilidade econômica de um projeto são:

– Valor Presente Líquido (VPL): o VPL é um método que calcula o valor presente de todos os fluxos de caixa futuros projetados gerados por um projeto, descontados a uma taxa de retorno mínima aceitável. Projetos com VPL positivo são considerados viáveis. A forma de se calcular o VPL é dada pela Equação 1.

$$VPL = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t} - FC_0 \quad (1)$$

Onde:

- FC é o fluxo de caixa no período t;
- t é o enésimo período no tempo em que o dinheiro será investido no projeto (começa no período 1, quando há efetivamente o primeiro fluxo de dinheiro);
- n é o número de períodos t;
- i é a TMA;
- FC₀ é o investimento inicial.

– Taxa Interna de Retorno (TIR): a TIR é a taxa de desconto que torna o VPL de um projeto igual a zero. Projetos com TIR superior à TMA são considerados viáveis. A forma de se calcular a TIR é dada pela Equação 2.

$$0 = \sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+TIR)^t} - FC_0 \quad (2)$$

– Payback Simples e Descontado: o payback simples indica o tempo necessário para recuperar o investimento inicial, enquanto o payback descontado leva em consideração o valor do dinheiro ao longo do tempo.

– Índice de Rentabilidade (IR): o IR compara o valor presente dos benefícios com o valor presente dos custos de um projeto. Projetos com IR superior a 1 são considerados viáveis. A forma de se calcular o IR é dada pela Equação 3.

$$IR = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{FC_t}{(1+i)^t}}{FC_0} \quad (3)$$

Segundo Ross et al. (2016), as etapas para montar um FCD são:

- i. Defina o horizonte de análise: determine o período para o qual você projetará os fluxos de caixa;

- ii. Orce os investimentos e despesas: defina os valores de cada despesa e os valores de cada item de investimento necessário para que a empresa comece a operar;
- iii. Determine o preço dos produtos e a quantidade a ser vendida por período: analise o preço dos concorrentes e defina as margens de lucro de cada produto para definir o preço de venda;
- iv. Projete os fluxos de caixa: crie uma planilha com as projeções de receitas, custos e fluxo de caixa líquido para cada período;
- v. Determine a taxa mínima de atratividade (TMA) ou taxa de desconto: calcule a taxa de desconto apropriada para o investimento;
- vi. Calcule os indicadores para verificar a viabilidade econômica: PAYBACK, VPL, TIR, IR;
- vii. Analise o resultado: interprete os indicadores para tomar a decisão de investimento.

Na fase de orçar os investimentos e as despesas, o projeto deve prever também o capital de giro necessário para suportar a operação da empresa. O capital de giro é o recurso financeiro necessário para que uma empresa mantenha suas operações diárias funcionando de forma contínua. Ele é usado para financiar as despesas operacionais de curto prazo, como pagamento de salários, compra de matérias-primas, pagamento de fornecedores, despesas com contas de luz, água, entre outras (ROSS et al., 2016).

A partir das informações levantadas de despesas, custo dos produtos vendido (CPV), prazo médio de pagamentos de fornecedores (PMP), prazo médio para recebimento de vendas (PMR) e prazo médio de renovação de estoque (PME), o capital de giro (CG) pode ser calculado da seguinte forma (ROSS et al., 2016):

$$CG = (PMR + PME - PMP) \times \frac{CPV}{360} \quad (4)$$

A Equação 4 mostra a necessidade de recursos para financiar os estoques e as vendas a prazo, subtraindo o crédito que a empresa tem com os fornecedores.

Todo investidor pode usar a estratégia de financiar o investimento em máquinas, equipamentos, mobiliário e obra civil. O parcelamento de investimento é uma forma de financiar a aquisição de bens, serviços ou ativos de forma gradual, dividindo o valor total em parcelas periódicas, geralmente mensais. Esse mecanismo permite que pessoas físicas e jurídicas realizem investimentos significativos sem a necessidade de desembolsar todo o capital de uma só vez.

Essa prática é amplamente utilizada por empresas e indivíduos para adquirir equipamentos, máquinas, imóveis, tecnologias e até mesmo investimentos em educação (cursos e treinamentos) ou marketing (campanhas publicitárias). O objetivo principal é facilitar o acesso a ativos de maior valor sem comprometer o fluxo de caixa de forma brusca. O parcelamento de investimento é uma forma de financiar a aquisição de bens, serviços ou ativos de forma gradual, dividindo o valor total em parcelas periódicas, geralmente mensais. Esse mecanismo permite que pessoas físicas e jurídicas realizem investimentos significativos sem a necessidade de desembolsar todo o capital de uma só vez.

O parcelamento de investimentos é uma estratégia que oferece uma série de benefícios, como:

- Melhor controle do fluxo de caixa: Permite que o investidor (empresa ou pessoa) mantenha os recursos financeiros disponíveis para outras demandas operacionais ou pessoais;
- Acesso a investimentos maiores: Facilita a aquisição de ativos de maior valor, que talvez não fossem acessíveis à vista;
- Previsibilidade financeira: Com parcelas fixas e prazos definidos, o investidor consegue planejar melhor o orçamento;
- Oportunidade de retorno durante o pagamento: Em muitos casos, o ativo adquirido (máquinas, softwares ou estoques) começa a gerar retorno antes mesmo de o financiamento ser concluído.

A forma de se calcular o a parcela de um financiamento (PMT) é dada pela Equação 5.

$$PMT = \frac{PV \cdot i \cdot (1 + i)^n}{(1 + i)^n - 1} \quad (5)$$

Onde:

PMT – Valor da parcela;

PV – Valor do investimento;

i – Taxa de juros;

n – número de parcelas.

2.10 Discussão sobre Lacunas na Literatura

Embora a co-digestão de RSOU e esterco suíno *in natura* tenha sido amplamente estudada (MATA-ALVAREZ et al., 2014; MURTO, BJÖRNSSON e MATTIASSON, 2004), o uso de esterco suíno desidratado, especialmente por meio do processo de secagem por aspersão, ainda é um campo pouco explorado. A maioria dos estudos concentra-se no esterco suíno *in natura*, que apresenta desafios logísticos e ambientais, como o alto volume e a dificuldade de transporte e armazenamento (CALISE et al., 2021). A desidratação do esterco suíno pode reduzir significativamente seu volume, facilitando o manejo e reduzindo os custos associados ao transporte, mas seu impacto na eficiência da digestão anaeróbica e na qualidade do biogás produzido ainda não foi suficientemente investigado.

Além disso, a integração da secagem por aspersão com a co-digestão de RSOU e esterco suíno é uma abordagem inovadora que ainda não foi explorada na literatura. A secagem por aspersão pode preservar as propriedades microbiológicas do esterco, mantendo sua viabilidade como substrato para a produção de biogás, mas essa hipótese ainda não foi testada de forma sistemática (MASTERS, 2019; MUJUMDAR, 2014). Portanto, o objetivo desta pesquisa de investigar o uso do esterco suíno desidratado na co-digestão com RSOU preenche uma lacuna importante na literatura, oferecendo uma nova perspectiva para a otimização do processo de produção de biogás.

O processo de secagem por aspersão é amplamente utilizado em indústrias como a alimentícia e farmacêutica, mas sua aplicação no tratamento de resíduos orgânicos, como o esterco suíno, ainda é incipiente. A literatura existente não apresenta estudos que explorem a viabilidade técnica e econômica da secagem por aspersão do esterco suíno para uso como

inóculo em biodigestores anaeróbicos (ANANDHARAMAKRISHNAN e ISHWARYA). A secagem por aspersão pode preservar as propriedades microbiológicas do esterco, mantendo sua viabilidade como substrato para a produção de biogás, mas essa hipótese ainda não foi testada de forma adequada.

Outra lacuna importante é a falta de estudos que avaliem o impacto da secagem por aspersão na composição físico-química do esterco suíno e sua influência na produção de biogás. A secagem pode alterar a concentração de nutrientes e a disponibilidade de matéria orgânica para os microrganismos anaeróbicos, o que pode afetar a eficiência do processo de digestão. Além disso, a secagem por aspersão pode gerar subprodutos, como partículas finas, que podem ter implicações para o manejo e a aplicação do digestato resultante. Portanto, o objetivo desta pesquisa de investigar o uso do esterco suíno desidratado pelo processo de secagem por aspersão preenche uma lacuna crítica na literatura, oferecendo novas perspectivas para o tratamento de resíduos orgânicos.

3. METODOLOGIA

3.1 Caracterização da Pesquisa

De acordo com Silva e Menezes (2005), uma pesquisa pode ser classificada do ponto de vista da sua natureza, da forma de abordagem do problema, de seus objetivos e dos procedimentos técnicos. A Tabela 2 sintetiza a explicação de cada uma delas.

Tabela 2. Formas de classificação das pesquisas.

Do ponto de vista da sua natureza	Pesquisa básica	Objetiva gerar conhecimentos novos úteis para o avanço da ciência sem aplicação prática prevista. Envolve verdades e interesses universais.
	Pesquisa aplicada	Objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos. Envolve verdades e interesses locais.
Do ponto de vista da forma de abordagem	Pesquisa quantitativa	Considera que tudo poder ser quantificável, o que significa traduzir em números opiniões e informações para classificá-las e analisá-las. Requer o uso de recursos e de técnicas estatísticas (percentagem, média, moda, mediana, desvio-padrão, coeficiente de correlação, análise de regressão, etc).
	Pesquisa qualitativa	Considera que há uma relação entre o mundo real e o sujeito, isto é, um vínculo indissociável entre o mundo objetivo e a subjetividade do sujeito que não pode ser traduzido em números. A interpretação dos fenômenos e a atribuição de significados são básicas no processo de pesquisa qualitativa. Não requer o uso de métodos e técnicas estatísticas. O ambiente natural é a fonte direta para a coleta de dados e o pesquisador é o instrumento-chave. É descritiva. Os pesquisadores tendem a analisar seus dados indutivamente. O processo e seu significado são os focos principais de abordagem.
Do ponto de vista de seus objetivos	Pesquisa exploratória	Visa proporcionar maior familiaridade com o problema com vistas a torná-lo explícito ou a construir hipóteses. Envolve levantamento bibliográfico; entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado; análise de exemplos que estimulem a compreensão. Assume, em geral, as formas de pesquisas bibliográficas e estudos de casos.

Continua...

Continuação da **Tabela 2.**

Do ponto de vista de seus objetivos	Pesquisa descritiva	Visa descrever as características de determinada população ou fenômeno ou o estabelecimento de relações entre variáveis. Envolve o uso de técnicas padronizadas de coletas de dados: questionário e observação sistemática. Assume, em geral, a forma de levantamento.
	Pesquisa explicativa	Visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos. Aprofunda o conhecimento da verdade orque explica a razão, o “porquê” das coisas. Quando realizada nas ciências naturais, requer o uso do método experimental, e nas ciências sociais requer o uso do método observacional. Assume, em geral, as formas de pesquisa experimental e pesquisa <i>expost-facto</i> .
Do ponto de vista dos procedimentos técnicos	Pesquisa bibliográfica	Quando elaborada a partir de material já publicado, constituído principalmente de livros, artigos de periódicos e atualmente com material disponibilizado na internet.
	Pesquisa documental	Quando elaborada a partir de materiais que não receberam tratamento analítico.
	Pesquisa experimental	Quando se determina um objeto de estudo, selecionam-se as variáveis que seriam capazes de influenciá-lo, definem-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.
	Levantamento	Quando a pesquisa envolve a interrogação direta das pessoas cujo comportamento se deseja conhecer.
	Estudo de caso	Quando envolve o estudo profundo e exaustivo de um ou poucos objetos de maneira que se permita o seu amplo e detalhado conhecimento.
	Pesquisa <i>expost-facto</i>	Quando o “experimento” se realiza depois dos fatos.
	Pesquisa-ação	Quando concebida e realizada em estreita associação com uma ação ou com a resolução de um problema coletivo. Os pesquisadores e representantes representativos da situação ou do problema estão envolvidos de modo cooperativo ou participativo.
Pesquisa participante	Quando se desenvolve a partir da interação entre pesquisadores e membros das situações investigadas.	

Fonte: Adaptado de Silva e Menezes, 2005.

Desta forma, a Tabela 3 mostra como essa pesquisa pode ser classificada:

Tabela 3. Classificação da pesquisa.

Do ponto de vista da sua natureza	Pesquisa aplicada	A pesquisa objetiva gerar conhecimentos para aplicação prática e dirigidos à solução de problemas específicos.
Do ponto de vista da forma de abordagem do problema	Pesquisa quantitativa (predominantemente)	A pesquisa utiliza do uso de recursos e de técnicas estatísticas.
Do ponto de vista de seus objetivos	Pesquisa explicativa	A pesquisa visa identificar os fatores que determinam ou contribuem para a ocorrência dos fenômenos. A pesquisa utiliza de um método experimental.
Do ponto de vista dos procedimentos técnicos	Pesquisa experimental	A pesquisa determinou um objeto de estudo, selecionou as variáveis capazes de influenciar, definiu-se as formas de controle e de observação dos efeitos que a variável produz no objeto.

Fonte: Adaptado de Silva e Menezes, 2005.

3.2 Coleta e Preparo do RSUO

O RSUO utilizado como substrato na co-digestão foi obtido a partir de uma adaptação da composição gravimétrica e características físico-químicas baseada na composição do RSUO do município do Rio de Janeiro/RJ. Esse RSUO foi utilizado como padrão, pois a cidade do Rio de Janeiro (RJ) gera aproximadamente 8.600 toneladas diárias de RSUO. Cerca de 40% desse total é direcionado para a Unidade de Transbordo de Resíduos (UTR) do Caju, de onde é transportado para o Aterro de Seropédica (a 80 km de distância) (ORNELAS et al., 2020). Como esse estudo foi motivado por uma pesquisa desenvolvida na UFRRJ, esse local apresenta a melhor relação custo-benefício no que se refere a fonte de RSUO, tendo em vista, principalmente, a distância geográfica. A Tabela 4 mostra a composição gravimétrica do RSUO da UTR do Caju.

Tabela 4. Composição gravimétrica e características físico-químicas da fração orgânica do RSUO da UTR do Caju.

	Parâmetro	Unidade	Valor
Composição do RSUO	Frutas e vegetais	%	44
	Carne e laticínios	%	8
	Massas e grãos	%	21
	Folhas e galhos	%	10
	Inertes	%	17

Fonte: Adaptado de Ornelas et al., 2020.

A Tabela 5 mostra o RSUO utilizado nesse estudo. O RSUO simulado foi escolhido dentro dos grupos de alimentos descritos na Tabela 4.

Tabela 5. RSUO utilizado no referido estudo.

Composição dos resíduos	Massa (g)	CHO (g)	PTN (g)	LIP (g)	FIBRA (g)	N	C	C/N
Arroz polido cozido	100	28,80	2,38	0,41	1,20	0,38	11,52	30,32
Feijão preto cozido	100	14,00	4,48	0,54	8,40	0,71	5,60	7,89
Frango cozido	100	-	32,00	2,48	-	5,12	-	-
Cenoura crua com casca	100	4,55	1,12	0,21	2,98	0,17	1,82	10,71
Repolho cru	100	4,42	1,12	0,14	1,92	0,17	1,76	10,35
Banana in natura sem casca	100	26,70	1,25	0,70	1,46	0,20	10,68	53,40
Leite integral UHT	100	7,16	2,35	3,84	-	0,20	2,86	14,30
RSUO - Total								20,37

Fonte: Elaborado pelo Autor.

3.3 Coleta e Preparo do Inóculo

3.3.1 Esterco suíno in natura

Durante o período de coleta, os suínos estavam confinados em diferentes pocilgas (Figura 3), denominadas salas de engorda (terminação), com aproximadamente quinze animais por sala. A alimentação dos suínos era predominantemente composta por ração. A granja que cedeu a matéria-prima fica localizada na região rural Serra d'água, município de Angra dos Reis, situada na latitude 22° 54' 2,322" S e longitude 44° 24' 48,895" O.



Figura 3. Porcos na granja situada na região rural Serra d'água, município de Angra dos Reis/RJ. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

3.3.2 Esterco suíno desidratado pelo processo *spray drying*

As amostras de inóculo foram separadas em porções de 200 ml. Foi utilizado nessa pesquisa o *spray drying* de escala laboratorial modelo Buchi mini *spray dryer* B290, Flawil, Suíça (Figura 4) com operação em bateladas de 200 ml. Os parâmetros de secagem por pulverização foram otimizados pela Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) (LAVARI et al., 2014), utilizando um planejamento composto central (PCC) em dois níveis (Tabela 6).



Figura 4. Equipamento spray dryer utilizado na pesquisa. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

Tabela 6. Planejamento composto central utilizado para otimizar a secagem por spray drying da solução de esterco suíno, empregando a MSR.

Variável independente	Variável código	Nível		
		1	0	-1
Fluxo de ar (mm)*	X1	50	40	30
Temperatura de entrada (°C)	X2	160	145	130

* mm a coluna do equipamento utilizado, corresponde a 601 l/h (50 mm), 473 l/h (40 mm) e 357 l/h (30 mm).
Fonte: Adaptado de Lavari et al., 2014.

As variáveis independentes utilizadas foram fluxo de ar e temperatura de entrada, utilizando dois níveis para cada uma delas. As variáveis de resultado consideradas para otimização foram umidade (menos de 5%) e temperatura de saída. Como não há relatos na literatura a respeito da condição de referência na secagem do esterco suíno através do processo de *spray drying*, foi realizada como condição de referência (PÁEZ et al. 2012) devido a semelhança na viscosidade do fluido.

3.4 Caracterização Físico-Química das Amostras

Foram realizadas análises físico-químicas para a caracterização da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos, dos dejetos suínos, assim como das misturas (fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos e inóculos em diferentes proporções), antes e após o processo de biodigestão, conforme os procedimentos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2002). As análises foram realizadas no Laboratório de Nanociência e meio ambiente no Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca (CEFET/RJ - campus Angra dos Reis). Os parâmetros avaliados incluíram umidade, sólidos voláteis (SV), sólidos totais (ST), pH, carbono (C) e nitrogênio (N). Os métodos analíticos aplicados para cada parâmetro estão detalhados no Tabela 7.

Tabela 7. Parâmetros de caracterização de inóculo, substrato e meios reacionais com respectivos métodos analíticos empregados.

Parâmetro	Método analítico
Umidade (%)	Gravimétrico
SV (mg.L ⁻¹)	Gravimétrico
ST (mg.L ⁻¹)	Gravimétrico
pH	Potenciométrico
C e N	Determinação por combustão a seco (CNHOS)

Fonte: APHA, 2002.

3.5 Procedimento Experimental

3.5.1 Biodigestores de bancada

Dois biodigestores foram construídos em aço inox e soldado pelo processo MAG. O biodigestor apresenta formato cilíndrico com volume de 4,42 litros. A tampa do biodigestor tem 6 entradas: (a) entrada para o termômetro (marca JPA, modelo analógico 15 PSI x 1 KGF); (b) entrada para o misturador; (c) entrada de alimentação e suplementação; (d) manômetro acoplado na tampa do biodigestor; (e) saída do biogás. O biodigestor construído foi do tipo de fluxo descontínuo (reator de estágio único). A visão esquemática do biodigestor está descrita na Figura 5 e a Figura 6 apresenta os dois biodigestores montados.

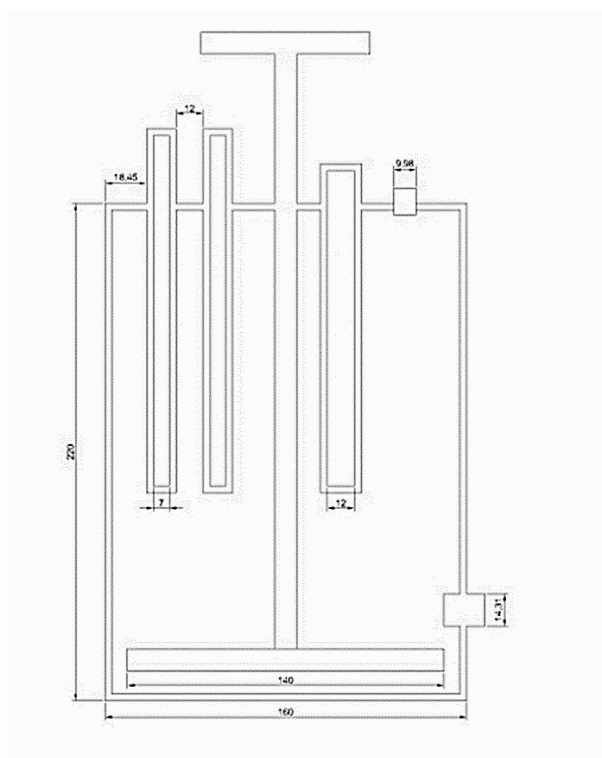


Figura 5. Visão esquemática do biodigestor projetado. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.



Figura 6. Foto dos biodigestores utilizados no experimento. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

3.5.2 Batelada experimental

Para o experimento, utilizou-se os 2 biodigestores de bancada (Figura 6). Um biodigestor foi alimentado com RSUO e esterco suíno *in natura* na proporção 1:1. O segundo biodigestor foi alimentado com RSUO e esterco suíno desidratado pelo processo de *spray drying*, equivalente a quantidade *in natura*, mais água destilada para alcançar o mesmo volume do conjunto substrato mais inóculo utilizado no biodigestor 1.

As amostras iniciais de RSUO + Inóculo foram misturadas, cortadas e trituradas em um processador industrial Cutter – Skymesen CR-4L (Figura 7). Esse procedimento visou reduzir o tamanho dos resíduos e homogeneizar a amostra. Uma fração de cada amostra foi retirada para realizar a caracterização físico-química de entrada (inicial). Após o processamento, os resíduos foram transferidos para seus respectivos biodigestores.



Figura 7. Processador industrial utilizado no experimento. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

3.5.3 Volume de biogás produzido

Os biodigestores foram observados por um período de 30 dias. Segundo Hansen et al. (2004, p. 395), em condições termofílicas (55°C), a maior parte do biogás é gerada nos primeiros 10 dias de experimento. Já para Labatut, Angement e Scott (2011), em condições mesofílicas (35°C), a geração de biogás atinge um platô, ou seja, se estabiliza, após 30 dias.

A avaliação do volume de biogás produzido foi feita a partir de manômetros da marca JPA, modelo analógico 15PSI S 1KGF (Figura 8) que foram instalados nos biodigestores para medir a pressão do biogás gerado durante o processo de digestão. As leituras foram registradas diariamente.



Figura 8. Modelo do manômetro utilizado na pesquisa. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

A estimativa da produção de biogás foi realizada utilizando a equação dos gases ideais (Equação 6):

$$P.V = n.R.T \quad (6)$$

Onde:

P = pressão (kPa);

V = volume do digestor (m³);

n = quantidade química (mol);

R = constante dos gases ideais;

T = a temperatura (°C).

3.5.4 Caracterização do biogás

A caracterização do biogás foi realizada a cada 5 dias. Para o armazenamento e transporte do biogás foram utilizados frascos de penicilina que, por sua vez, foram selados em sua extremidade inferior e preenchidos com um líquido selante preparado conforme a norma DIN 38414-8 (DIN, 1985). A solução selante consistiu de 30 mL de ácido sulfúrico, 200 g de sulfato de sódio deca-hidratado e algumas gotas de indicador de metila laranja. A caracterização do biogás foi conduzida em um cromatógrafo gasoso (Figura 9) GC-FID/TCD Agilent, modelo 7890B, utilizando como referência os métodos GC-2010, com gás de arraste argônio, e GC-2014, com gás de arraste hidrogênio.



Figura 9. Modelo de cromatógrafo utilizado na pesquisa. Fonte: Acervo fotográfico do Autor.

Os dados obtidos durante o experimento foram submetidos a uma análise estatística adequada para avaliar a significância das diferenças observadas entre os tratamentos. Foram utilizadas técnicas estatísticas, como análise de variância (ANOVA) e testes de comparação de médias, com um nível de significância de $\alpha = 0,05$.

Dado que o fator de compressibilidade do biogás é próximo de 1 (um), isso demonstra que é íável empregar a equação dos gases ideais para o dimensionamento da produção de biogás (ZANK et al., 2020).

3.5.5 Análise econômica

As decisões de investimentos dizem respeito aos comprometimentos de recursos necessários para a organização obter, em um momento futuro, algum tipo de retorno. As decisões de investimento a longo prazo, por sua vez, são relacionadas a operações cujas repercussões ocorrerão em horizontes temporais maiores. A construção de uma planta de produção e distribuição de material inoculante é um exemplo de decisão com impacto no longo prazo. Para tanto, é preciso passar por um processo de orçamento de capital para que os seguintes questionamentos sejam respondidos:

- O projeto maximizará a riqueza dos investidores?
- O projeto se pagará?
- Quais são os riscos envolvidos?

Em resposta a estes questionamentos, para Junior et al (2005), há dois tipos de informações fundamentais à adoção das técnicas de orçamento de capital:

- i. Estimativa dos fluxos de caixa livres do projeto;
- ii. Determinação de qual TMA deve ser considerada para descontar esses fluxos.

O presente estudo simula a criação de uma empresa com o objetivo de fabricar esterco suíno desidratado pelo processo de *spray drying* que funcionará como inoculante em biodigestores anaeróbicos e terá como clientes usinas de biogás que utilizam como substrato o RSUO. Para a análise de mercado do referido projeto, foram adotadas as seguintes premissas:

- Produto a ser produzido: esterco suíno desidratado pelo processo de *spray drying*;
- Devido a riscos ambientais e logísticos, é imperativo que a planta fabril seja instalada nas dependências da granja e tudo o que é coletado em um dia é processado no mesmo dia;
- A granja possui uma população de 220 suínos;
- Localização da granja: Paraná, por ser um dos maiores produtores de suínos do Brasil;
- Cada suíno produz 7 litros de esterco por dia (KONZEN, 1980);
- Metade do esterco suíno da granja é destinada para produção de esterco suíno desidratado pelo processo de *spray drying*;
- Toda a produção será vendida.

Para a empresa iniciar a operação, considerou-se que a empresa teria que investir na estrutura do local (obra civil de um galpão mais móveis e utensílios) e adquirir os seguintes equipamentos:

- 1 tanque misturador de 217 litros;
- 1 misturador para o tanque;

- 1 *spray dryer* com capacidade de processar 60 Kg/h.

Para formar o preço de venda do produto, considerou-se todas as despesas envolvidas para uma operação de 12 (doze) horas trabalhadas por dia durante os 365 dias do ano:

- Despesas com consumo de energia dos equipamentos e instalação (Kwh);
- Despesas com mão-de-obra;
- Despesas com serviços contábeis e jurídicos;
- Despesas com manutenção dos equipamentos;
- Demais despesas não planejadas; e
- Margem de lucro de 50%.

O cálculo da margem de lucro é dado pela Equação 7:

$$Mg = \frac{P - Cu}{P} \quad (7)$$

Onde:

- Mg – Margem de lucro;
- P – Preço de venda sem impostos;
- Cu – Custo unitário do produto.

Para estimar as despesas com manutenção dos equipamentos, foi considerado o trabalho realizado por CHAVES et al. (2020), que adotou uma despesa anual de 2,5% sobre o investimento inicial em equipamentos.

Para verificar se compensa financeiramente para a usina de biogás (cliente) adquirir o produto, considerou-se uma usina que processa 1 tonelada mensalmente de RSUO e produz 1.440 m³ de metano por mês. Esses dados foram projetados com base na usina de biogás de São Pedro da Aldeia/RJ que processa 800 toneladas de RSUO mensalmente e produz 1.152.000 m³ de metano por mês (BRASIL, 2020). Além disso, considerou-se o preço de R\$3,16 do metro cúbico de metano (CBIE, 2024).

Para determinar o capital de giro (CG) necessário para suportar a operação, considerou-se os seguintes prazos:

- Prazo Médio de Recebimento (PMR) – 45 dias
- Prazo Médio de Pagamento (PMP) – 30 dias
- Prazo Médio de Estoque (PME) – 60 dias

Simulou-se o fluxo de caixa para investimento em equipamentos, máquinas, mobiliário e obra civil realizado no período zero e simulou-se também o fluxo de caixa financiando a aquisição de equipamentos, máquinas, mobiliário e obra civil em 10 parcelas anuais com uma taxa de juros de 18% ao ano para o financiamento.

Os fluxos de caixa foram projetados por 20 anos a preço corrente para verificar se o investimento na empresa é compensatório. Os indicadores utilizados foram: VPL, TIR, payback simples, payback descontado e IL. Para tanto, utilizou-se uma TMA de 16% ao ano.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização Físico-Química Inicial e Final dos Biodigestores

A Tabela 8 apresenta a caracterização físico-química inicial e final (após os 30 dias de digestão) de cada biodigestor: o primeiro inoculado com esterco suíno in natura; e o segundo inoculado com esterco suíno desidratado pelo processo de *spray drying*.

Tabela 8. Caracterização físico-química inicial e final dos biodigestores.

Parâmetro	Esterco suíno in natura + RSUO (1:1)		Esterco suíno desidratado + RSUO (1:1)	
	Inicial	Final	Inicial	Final
Unidade (%)	85,30 ± 0,21	78,16 ± 0,28	83,40 ± 0,65	78,01 ± 0,78
SV (% ST)	88,24 ± 2,28	83,24 ± 0,18	86,39 ± 2,13	83,39 ± 0,11
pH	5,40 ± 0,04	5,02 ± 0,08	5,80 ± 0,08	5,08 ± 0,14
C (%)	30,25 ± 0,15	20,28 ± 0,05	29,35 ± 0,48	18,54 ± 0,11
N (%)	1,48 ± 0,09	1,08 ± 0,12	1,41 ± 0,06	1,01 ± 0,08
C/N	20,43 ± 0,36	18,77 ± 0,05	20,81 ± 0,46	18,35 ± 0,12

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com relação ao teor de sólidos voláteis (SV), os dois biodigestores apresentaram, no início da biodigestão (*start up* dos reatores) um alto potencial de degradação, evidenciado pelo elevado teor inicial de sólidos voláteis, que ficou entre 86 e 90% (com base no teor de sólidos totais), valores estes acima dos reportados nos trabalhos de Crovador (2014), Schirmer et al. (2014) e Barcelos (2009). Ao analisar os teores finais de sólidos voláteis, notou-se que a redução deste parâmetro foi pequena, indicando a existência de substratos passíveis de degradação (e, portanto, geração de biogás) mesmo após os 30 dias de digestão.

Com relação ao pH, as duas amostras apresentaram valores similares entre o pH inicial e o pH final em ambos os biodigestores, ficando entre 5 e 6. A relação C/N apresentou uma perda de aproximadamente 2 pontos. Mesmo com essa perda, a relação C/N ficou dentro da faixa considerada ideal por Regazi et al. (2021).

4.2 Comparação dos Volumes de Biogás Produzidos Durante o Processo de Produção no Biodigestor Anaeróbico de Fase Única na Co-digestão de Esterco Suíno In Natura com RSUO e na Utilização de Esterco Suíno Desidratado pelo Processo de Secagem por Aspersão (*Spay Drying*) com RSUO

Para equiparação das quantidades de matéria orgânica contida entre o esterco suíno desidratado pelo processo de *spray drying* e o esterco suíno in natura, foi avaliado o quantitativo de água no esterco in natura. O esterco in natura após sofrer o processo de *spray drying*, perdeu, em 100 gramas, 74 gramas do seu peso, sendo esse peso perdido caracterizado pela parte líquida do esterco (água) perdida pela secagem por atomização. Dessa forma 100 gramas de esterco suíno utilizado, corresponde a 26 gramas de esterco desidratado pelo processo de *spray drying*, indo ao encontro do estudo de Lehmann et al. (2020) que afirma que o esterco suíno apresenta entre 70 e 85% de umidade.

Em seguida, uma batelada inicial foi realizada com o intuito de ver o potencial de produção de biogás para o esterco desidratado pelo processo de *spray drying*. Dessa maneira, dois biodigestores de bancada foram utilizados com a mesma configuração: esterco suíno e RSUO na proporção 1:1. Todavia um biodigestor usou esterco suíno in natura e o outro biodigestor utilizou o esterco desidratado pelo processo de *spray drying*. Importante ressaltar

que no biodigestor com esterco desidratado pelo processo de *spray drying*, foi acrescido 74 gramas de água destilada para equiparar o peso do esterco in natura utilizado no outro biodigestor.

Os dois biodigestores foram observados por 30 (trinta) dias, após esse período percebeu-se um platô na geração de biogás, indo ao encontro do estudo de Labatut, Angement e Scott (2011). A figura 10, mostra a produção de biogás nos 2 biodigestores ao longo dos 30 (trinta) dias de operação dos biodigestores.

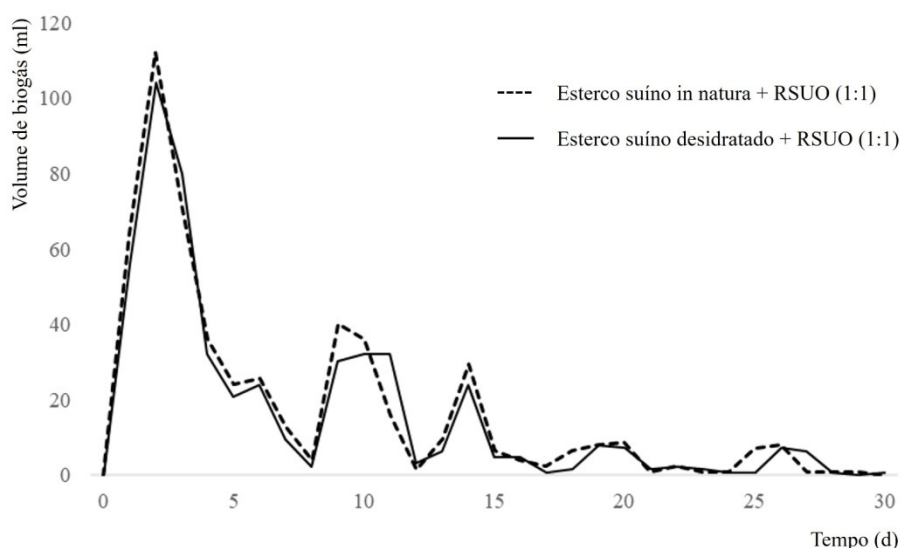


Figura 10. produção de biogás ao longo dos 30 dias de operação do biodigestor em dois diferentes cenários. Fonte: Elaborado pelo Autor.

O resultado foi muito promissor, pois deixa claro que não há mudança significativa do uso do esterco desidratado pelo processo de *spray drying*. Além da manutenção das características físico-químicas, a falta de umidade no esterco desidratado atrasa o processo de hidrólise, pois mantém a integridade as paredes celulares de bactérias de fermentação devido a falta de hidratação (MAGALHÃES, 2018; FERREIRA, 2013).

4.3 Comparação das Concentrações de Metano e Dióxido de Carbono Durante o Processo de Produção no Biodigestor Anaeróbico de Fase Única na Co-digestão de Esterco Suíno In Natura com RSUO e na Utilização de Esterco Suíno Desidratado pelo Processo de Secagem por Aspersão (*Spay Drying*) com RSUO

Os resultados obtidos para a caracterização do biogás quanto às concentrações de CH₄, CO₂ e H₂S encontram-se na Tabela 9.

Tabela 9. Composição média de CH₄, CO₂ e H₂S para todos os tratamentos empregados.

Parâmetro	Esterco suíno in natura + RSUO (1:1)				Esterco suíno desidratado + RSUO (1:1)			
	Dia 5	Dia 10	Dia 15	Dia 25	Dia 5	Dia 10	Dia 15	Dia 25
CH ₄ (%)	69	72	81,2	77,5	68,4	71,5	80	76,4
CO ₂ (%)	30,2	27,5	18,6	22,3	31,2	28	19,8	23,4
H ₂ S (%)	0,5	0,4	0,1	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1
Outros (%)	0,3	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1

Fonte: Elaborado pelo Autor.

De acordo com Tchobanoglous, Theisen e Vigil (1993), a conversão biológica da fração biodegradável presente nos resíduos leva à formação de dióxido de carbono, metano, amônia, sulfeto de hidrogênio e matéria orgânica resistente. Para estes autores, cerca de 99% do total de gases produzidos é composto por metano e dióxido de carbono.

Os valores de concentração de metano apresentados sugerem o estabelecimento de fase metanogênica desde o início do experimento para todos os tratamentos avaliados, muito provavelmente devido ao estabelecimento de condições anaeróbicas desde o *start up* dos biodigestores.

Em todas as medições, a concentração de metano esteve acima 60% o que caracteriza um biogás de elevada qualidade.

4.4 Investigação do Potencial Econômico do Uso do Esterco Suíno Desidratado pelo Processo de Secagem por Aspersão (*Spray Drying*) na Co-digestão com Resíduos Sólidos Urbanos Orgânicos (RSUO) para a Produção de Biogás por Meio de Biodigestores Anaeróbicos de Fase Única

O presente estudo simula a criação de uma empresa com o objetivo de fabricar esterco suíno desidratado pelo processo de *spray drying* que funcionará como inoculante em biodigestores anaeróbicos e terá como clientes usinas de biogás que utilizam como substrato o RSUO.

Adotou-se a premissa que essa planta fabril do esterco suíno desidratado pelo processo de *spray drying* está instalada nas dependências da granja suína. Desta forma, pode-se descartar os gastos com o transporte do esterco suíno in natura até a planta fabril.

Uma granja com 220 suínos produz diariamente 1.540 litros de esterco suíno. Considerou-se que a metade desse esterco (770 litros) será destinado à planta fabril. A Tabela 10 mostra os investimentos necessários para que o projeto possa ser iniciado.

Tabela 10. Itens do investimento inicial.

Descrição	Quantidade	Valor unit. (R\$)	Total (R\$)
Tanque para misturador de 217 litros	1	5.600,00	5.600,00
Misturador para o tanque	1	124.300,00	124.300,00
Spray Dryer - 60 Kg/h	1	250.000,00	250.000,00
Obra civil + Móveis e Utensílios	1	150.000,00	150.000,00
Total			529.900,00

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Esse investimento parcelado em 10 parcelas anuais a uma taxa de juros de 18% ao ano, gera uma parcela de R\$117.910,51. A Tabela 11 demonstra esse parcelamento separando os juros e a amortização da dívida da parcela.

Tabela 11. Descritivo do parcelamento do investimento.

n	PMT	Juros	Armotização	Saldo
0	-	-	-	529.900,00
1	117.910,51	95.382,01	22.528,51	507.371,49
2	117.910,51	91.326,97	26.583,64	480.787,45
3	117.910,51	86.541,81	31.368,70	449.419,16

Continua...

Continuação da **Tabela 11.**

n	PMT	Juros	Armotização	Saldo
4	117.910,51	80.895,45	37.015,06	412.404,10
5	117.910,51	74.232,74	43.677,77	368.726,33
6	117.910,51	66.370,74	51.539,77	317.186,56
7	117.910,51	57.093,58	60.816,93	256.369,63
8	117.910,51	43.146,73	71.763,98	184.605,95
9	117.910,51	33.229,02	84.681,49	99.924,16
10	117.910,51	17.986,35	99.924,16	-

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Os dados foram obtidos por meio de pesquisa de mercado no período de agosto/2024 e outubro/2024. Com esses equipamentos, a empresa possui uma capacidade máxima de produção de 187 Kg/dia de esterco suíno desidratado pelo processo de spray drying. Desta forma, a capacidade máxima de produção de um mês é 5.616 Kg.

A Tabela 12 mostra as despesas com consumo de energia e manutenção mensal dos equipamentos. Considerou-se uma operação diária durante os 365 dias do ano operando 12 horas por dia.

Tabela 12. Despesas mensais com consumo de energia elétrica, manutenção dos equipamentos, aluguel e serviços contábeis e jurídicos.

Descritivo	Consumo (Kwh)	Horas	Preço Kw/h	Total
Misturador para o tanque	7,5	360	0,79969	2.159,16
Spray Dryer 60 Kg/h	34	360	0,79969	9.788,21
Outros equipamentos	10	360	0,79969	2.878,88
Custo de manutenção mensal				791,46
Aluguel				2.000,00
Serviços contábeis e jurídicos				1.500,00
Total				19.177,71

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Tabela 13 apresenta as despesas de mão-de-obra. Os encargos trabalhistas e benefícios estão inclusos nessas despesas. O quantitativo de mão-de-obra foi obtido com os fornecedores dos equipamentos.

Tabela 13. Despesas com mão-de-obra.

Cargo	Salário bruto c/ encargos (R\$)	Quantidade	Total
Coordenação de produção	8.400,00	1	8.400,00
Analista de produção	3.000,00	3	9.000,00
Total			17.400,00

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Tabela 14 mostra a memória de cálculo para se chegar ao preço final do produto.

Tabela 14. Memória de cálculo do cálculo do preço do produto.

Descrição	Valor (R\$)
Custo operacional total mensal	36.607,71
Produção máxima mensal de inóculo desidratado (kg)	5.616
Custo unitário (/kg)	6,52
Preço com margem (50%)	13,04
Preço final com tributação (20,5%)	16,40

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Com esses dados, já é possível verificar se o cliente final (usina de biogás) se beneficiará com a utilização do esterco suíno desidratado pelo processo de *spray drying*. Para tanto, considerou-se que a utilização do esterco suíno desidratado aumenta em 30% a concentração de metano no biogás (IBRO, ANCHA, LEMA, 2022).

A Tabela 15 mostra o comparativo da viabilidade financeira entre uma usina de biogás que utiliza reator de fase única e uma usina de biogás que utiliza reator de fase contínua. É importante ressaltar que o que tornou viável a utilização do esterco suíno desidratado pelo processo de *spray drying* foi a capacidade das bactérias metanogênicas se duplicarem a cada 5 dias (ANGELIDAKI e SANDERS, 2004). Desta forma, colocando uma quantidade de 40 kg de inóculo (esterco suíno desidratado pelo processo de *spray drying*) em um reator de fase contínua no início do mês, no término desse mês haveria o quantitativo de bactérias o equivalente a 500 Kg de inóculo colocados no início do mês.

Tabela 15. Comparativo da viabilidade financeira entre usinas de biogás de fase única e contínua utilizando o esterco suíno desidratado pelo processo de *spray drying*.

Usina que processa 1 ton de RSUO sem inóculo	
Produção mensal biometano (m3):	1.440
Receita mensal (R\$):	4.553,73
Usina que processa 1 ton de RSUO com inóculo em reator de fase única	
Qtd. inóculo mensal demandada (kg):	500
Despesa com inóculo mensal (R\$):	8.199,33
Prod. Mensal de biometano com inóculo (+30%) (m3):	1.872
Receita mensal com inóculo (R\$):	5.919,85
Produção extra mensal de biometano com inóculo (m3):	432
Receita extra mensal com inóculo (R\$):	1.366,12
Prejuízo mensal (R\$) (Receita extra – Despesa com inóculo):	- 6.833,21
Usina que processa 1 ton de RSUO com inóculo em reator de fase contínua	
Qtd. inóculo mensal demandada (kg):	40
Despesa com inóculo mensal (R\$):	655,95
Prod. Mensal de biometano com inóculo (+30%) (m3):	1.872
Receita mensal com inóculo (R\$):	5.919,85
Produção extra mensal de biometano com inóculo (m3):	432
Receita extra mensal com inóculo (R\$):	1.366,12
Lucro extra mensal (R\$) (Receita extra – Despesa com inóculo):	710,17

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Pode-se observar que a usina de biogás de fase única tem um prejuízo de R\$6.833,21, enquanto a usina de biogás de fase contínua tem um lucro de R\$710,17.

As Tabelas 16 e 17 apresentam a projeção fluxo de caixa da empresa considerando as receitas e as despesas a valores corrente por um período de 20 anos (período que os equipamentos depreciam contabilmente) e investimento no período zero (Ano 0).

Tabela 16. Projeção do fluxo de caixa com investimento no período zero até o ano 9.

	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
Investimento	738.802,95	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Tanque para misturador de 217 litros	5.600,00									
Misturador para o tanque	124.300,00									
Spray Dryer - 60 Kg/h	250.000,00									
Obra civil + Móveis e Utensílios	150.000,00									
Capital de giro	208.902,95									
1. (+) Receita líquida	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06
1.1. Receita Bruta	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44
1.2. Impostos (20,5%)	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38
2. (-) Despesas	451.800,89	451.800,89	451.800,89	451.800,89	451.800,89	451.800,89	451.800,89	451.800,89	451.800,89	451.800,89
2.1. Folha Salatal	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00
2.2. Consumo Energia Elétrica	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03
2.3. Serviços de Contabilidade e Jurídicos	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00
2.4. Aluguel	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00
2.5. Manutenção de Equipamentos	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50
2.6. Outras Despesas	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36
2.7. Depreciação Equipamentos	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00
2.8. Depreciação Obra Civil + Móveis e Utensílios	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00
3. (=) LAIR (Lucro antes do imposto de renda) - EBIT	426.784,17	426.784,17	426.784,17	426.784,17	426.784,17	426.784,17	426.784,17	426.784,17	426.784,17	426.784,17
4. (-) IR (Imposto de renda) - 25%	106.696,04	106.696,04	106.696,04	106.696,04	106.696,04	106.696,04	106.696,04	106.696,04	106.696,04	106.696,04
5. (=) Lucro líquido após imposto de renda	320.088,13	320.088,13	320.088,13	320.088,13	320.088,13	320.088,13	320.088,13	320.088,13	320.088,13	320.088,13
6. (+) Depreciação	33.995,00	33.995,00	33.995,00	33.995,00	33.995,00	33.995,00	33.995,00	33.995,00	33.995,00	33.995,00
7. (-) CAPEX	738.802,95									
8. (=) Fluxo de caixa livre - FCL	- 738.802,95	354.083,13	354.083,13	354.083,13	354.083,13	354.083,13	354.083,13	354.083,13	354.083,13	354.083,13
9. FCL acumulado		354.083,13	708.166,26	1.062.249,39	1.416.332,51	1.770.415,64	2.124.498,77	2.478.581,90	2.832.665,03	3.186.748,16
10. (=) Fluxo de caixa livre descontado - FCLD		305.244,08	263.141,45	226.846,07	195.556,96	168.583,59	145.330,68	125.285,07	108.004,37	93.107,21
11. FCLD acumulado		305.244,08	568.385,52	795.231,59	990.788,55	1.159.372,14	1.304.702,82	1.429.987,88	1.537.992,25	1.631.099,47

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 17. Continuação da projeção do fluxo de caixa com investimento no período zero do ano 10 ao ano 20.

	Ano 10	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15	Ano 16	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20
Investimento											
Tanque para misturador de 217 litros											
Misturador para o tanque											
Spray Dryer - 60 Kg/h											
Obra civil + Móveis e Utensílios											
Capital de giro											
1. (+) Receita líquida	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06
1.1. Receita Bruta	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44
1.2. Impostos (20,5%)	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38
2. (-) Despesas	451.800,89	436.800,89	436.800,89	436.800,89	436.800,89	436.800,89	436.800,89	436.800,89	436.800,89	436.800,89	436.800,89
2.1. Folha Salatal	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00
2.2. Consumo Energia Elétrica	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03
2.3. Serviços de Contabilidade e Jurídicos	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00
2.4. Aluguel	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00
2.5. Manutenção de Equipamentos	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50
2.6. Outras Despesas	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36
2.7. Depreciação Equipamentos	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00
2.8. Depreciação Obra Civil + Móveis e Utensílios	15.000,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3. (=) LAIR (Lucro antes do imposto de renda) - EBIT	426.784,17	441.784,17	441.784,17	441.784,17	441.784,17	441.784,17	441.784,17	441.784,17	441.784,17	441.784,17	441.784,17
4. (-) IR (Imposto de renda) - 25%	106.696,04	110.446,04	110.446,04	110.446,04	110.446,04	110.446,04	110.446,04	110.446,04	110.446,04	110.446,04	110.446,04
5. (=) Lucro líquido após imposto de renda	320.088,13	331.338,13	331.338,13	331.338,13	331.338,13	331.338,13	331.338,13	331.338,13	331.338,13	331.338,13	331.338,13
6. (+) Depreciação	33.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00
7. (-) CAPEX											
8. (=) Fluxo de caixa livre - FCL	354.083,13	350.333,13	350.333,13	350.333,13	350.333,13	350.333,13	350.333,13	350.333,13	350.333,13	350.333,13	350.333,13
9. FCL acumulado	3.540.831,28	3.891.164,41	4.241.497,54	4.591.830,67	4.942.163,80	5.292.496,93	5.642.830,05	5.993.163,18	6.343.496,31	6.693.829,44	7.044.162,57
10. (=) Fluxo de caixa livre descontado - FCLD	80.264,84	68.461,01	59.018,12	50.877,69	43.860,07	37.810,41	32.595,18	28.099,29	24.223,53	20.882,35	18.002,03
11. FCLD acumulado	1.711.364,31	1.779.825,32	1.838.843,43	1.889.721,12	1.933.581,19	1.971.391,60	2.003.986,78	2.032.086,08	2.056.309,60	2.077.191,96	2.095.193,98

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Tabela 18 mostra o resultado dos indicadores resultantes da análise de investimento do fluxo de caixa projetado com investimento no período zero.

Tabela 18. Indicadores da análise de investimento para um horizonte de 20 anos a partir do FCD com investimento período zero.

TMA (ao ano):	16,00%
Payback simples (anos):	2,04
Payback descontado (anos):	2,23
TIR (ao ano):	47,90%
VPL:	1.356.391,04
IR	2,84

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Todos os indicadores para a projeção do FCD com investimento no período zero se mostraram positivos, o que indica que o investimento em um projeto de manufatura de esterco suíno desidratado pelo processo de *spray drying* é rentável. Analisando o payback descontado, o investimento realizado retorna em 2,23 anos. A Taxa Interna de Retorno do projeto supera quase 3 vezes a Taxa Mínima de Atratividade. O valor presente líquido (VPL) do projeto em um horizonte de 20 anos é positivo, R\$1.356.391,04. Nesse horizonte, o projeto se paga 2,84 vezes (Índice de Lucratividade - IL).

As Tabelas 19 e 20 apresentam a projeção fluxo de caixa da empresa considerando as receitas e as despesas a valores corrente por um período de 20 anos (período que os equipamentos depreciam contabilmente) e com investimento parcelado em 10 anos.

Tabela 19. Projeção do fluxo de caixa com investimento financiado em 10 parcelas anuais até o ano 9.

	Ano 0	Ano 1	Ano 2	Ano 3	Ano 4	Ano 5	Ano 6	Ano 7	Ano 8	Ano 9
Investimento	208.902,95									
Capital de giro	208.902,95									
1. (+) Receita líquida	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06
1.1. Receita Bruta	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44
1.2. Impostos (20,5%)	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38
2. (-) Despesas	474.329,40	478.384,53	483.169,59	488.815,95	495.478,66	503.340,66	512.617,82	523.564,87	536.482,38	536.482,38
2.1. Folha Salarial	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00
2.2. Consumo Energia Elétrica	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03
2.3. Serviços de Contabilidade e Jurídicos	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00
2.4. Aluguel	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00
2.5. Manutenção de Equipamentos	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50
2.6. Amortização do financiamento	22.528,51	26.583,64	31.368,70	37.015,06	43.677,77	51.539,77	60.816,93	71.763,98	84.681,49	84.681,49
2.7. Outras Despesas	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36
2.8. Depreciação Equipamentos	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00
2.9. Depreciação Obra Civil + Móveis e Utensílios	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00	15.000,00
3. (=) LAIR (Lucro antes do imposto de renda) - EBIT	404.255,66	400.200,53	395.415,48	389.769,11	383.106,40	375.244,40	365.967,24	355.020,20	342.102,68	342.102,68
4. (-) IR (Imposto de renda) - 25%	101.063,92	100.050,13	98.853,87	97.442,28	95.776,60	93.811,10	91.491,81	88.755,05	85.525,67	85.525,67
5. (-) Juros do financiamento (i = 18% a.a.)	95.382,00	91.326,87	86.541,81	80.895,45	74.232,74	66.370,74	57.093,58	46.146,53	33.229,02	33.229,02
6. (=) Lucro líquido após imposto de renda	207.809,75	208.823,53	210.019,79	211.431,39	213.097,06	215.062,56	217.381,85	220.118,61	223.347,99	223.347,99
7. (+) Depreciação	33.995,00	33.995,00	33.995,00	33.995,00	33.995,00	33.995,00	33.995,00	33.995,00	33.995,00	33.995,00
8. (-) CAPEX	208.902,95									
9. (=) Fluxo de caixa livre - FCL	- 208.902,95	241.804,75	242.818,53	244.014,79	245.426,39	247.092,06	249.057,56	251.376,85	254.113,61	257.342,99
10. FCL acumulado	241.804,75	484.623,28	728.638,07	974.064,46	1.221.156,52	1.470.214,08	1.721.590,93	1.975.704,55	2.233.047,54	2.233.047,54
11. (=) Fluxo de caixa livre descontado - FCLD	208.452,37	180.453,72	156.329,95	135.546,81	117.643,75	102.223,75	88.944,55	77.511,12	67.669,11	67.669,11
12. FCLD acumulado	208.452,37	388.906,09	545.236,04	680.782,85	798.426,60	900.650,34	989.594,90	1.067.106,02	1.134.775,13	1.134.775,13

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Tabela 20. Continuação da projeção do fluxo de caixa com investimento financiado em 10 parcelas anuais do ano 10 ao ano 20.

	Ano 10	Ano 11	Ano 12	Ano 13	Ano 14	Ano 15	Ano 16	Ano 17	Ano 18	Ano 19	Ano 20
Investimento											
Capital de giro											
1. (+) Receita líquida	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06	878.585,06
1.1. Receita Bruta	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44	1.105.138,44
1.2. Impostos (20,5%)	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38	226.553,38
2. (-) Despesas	551.725,05	436.800,89	436.800,89	436.800,89	436.800,89	436.800,89	436.800,89	436.800,89	436.800,89	436.800,89	436.800,89
2.1. Folha Salarial	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00	208.800,00
2.2. Consumo Energia Elétrica	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03	177.915,03
2.3. Serviços de Contabilidade e Jurídicos	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00	1.500,00
2.4. Aluguel	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00	2.000,00
2.5. Manutenção de Equipamentos	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50	9.497,50
2.6. Amortização do financiamento	99.924,16	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
2.7. Outras Despesas	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36	18.093,36
2.8. Depreciação Equipamentos	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00
2.9. Depreciação Obra Civil + Móveis e Utensílios	15.000,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3. (=) LAIR (Lucro antes do imposto de renda) - EBIT	326.860,01	441.784,17	441.784,17	441.784,17	441.784,17	441.784,17	441.784,17	441.784,17	441.784,17	441.784,17	441.784,17
4. (-) IR (Imposto de renda) - 25%	81.715,00	110.446,04	110.446,04	110.446,04	110.446,04	110.446,04	110.446,04	110.446,04	110.446,04	110.446,04	110.446,04
5. (-) Juros do financiamento (i = 18% a.a.)	17.986,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
6. (=) Lucro líquido após imposto de renda	227.158,66	331.338,13	331.338,13	331.338,13	331.338,13	331.338,13	331.338,13	331.338,13	331.338,13	331.338,13	331.338,13
7. (+) Depreciação	33.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00	18.995,00
8. (-) CAPEX											
9. (=) Fluxo de caixa livre - FCL	261.153,66	350.333,13	350.333,13	350.333,13	350.333,13	350.333,13	350.333,13	350.333,13	350.333,13	350.333,13	350.333,13
10. FCL acumulado	2.494.201,20	2.844.534,33	3.194.867,46	3.545.200,58	3.895.533,71	4.245.866,84	4.596.199,97	4.946.533,10	5.296.866,23	5.647.199,36	5.997.532,48
11. (=) Fluxo de caixa livre descontado - FCLD	59.199,25	68.461,01	59.018,12	50.877,69	43.860,07	37.810,41	32.595,18	28.099,29	24.223,53	20.882,35	18.002,03
12. FCLD acumulado	1.193.974,38	1.262.435,39	1.321.453,51	1.372.331,19	1.416.191,27	1.454.001,67	1.486.596,85	1.514.696,15	1.538.919,68	1.559.802,03	1.577.804,06

Fonte: Elaborado pelo Autor.

A Tabela 21 mostra o resultado dos indicadores resultantes da análise de investimento do fluxo de caixa projetado com investimento parcelado em 10 parcelas anuais.

Tabela 21. Indicadores da análise de investimento para um horizonte de 20 anos a partir do FCD com investimento parcelado em 10 parcelas anuais.

TMA (ao ano):	16,00%
Payback simples (anos):	0,68
Payback descontado (anos):	1,14
TIR (ao ano):	116,26%
VPL:	1.368.901,11
IR	7,55

Fonte: Elaborado pelo Autor.

Todos os indicadores para a projeção do FCD com investimento financiado em 10 parcelas anuais se mostraram positivos e melhores que a projeção do FCD com investimento no período zero. Analisando o payback descontado, o investimento realizado retorna em 1,14 anos. O Taxa Interna de Retorno do projeto é de 116,26% ao ano, muito superior aos 16% ao ano da Taxa Mínima de Atratividade. O valor presente líquido (VPL) do projeto em um horizonte de 20 anos é positivo, R\$1.368.901,11, pouco superior ao VPL . Nesse horizonte, o projeto se paga 7,55 vezes (Índice de Lucratividade - IL).

5. CONCLUSÕES

A presente pesquisa teve como objetivo central avaliar a viabilidade técnica e econômica da utilização do esterco suíno desidratado pelo processo de secagem por aspersão (*spray drying*) na co-digestão com resíduos sólidos urbanos orgânicos (RSOU) para a produção de biogás em biodigestores anaeróbicos de fase única. Os resultados obtidos revelaram evidências significativas que confirmam a hipótese inicial de que o uso de esterco suíno desidratado apresenta desempenho técnico e econômico compatível com o uso de esterco suíno in natura, trazendo vantagens logísticas e ambientais.

Os principais achados da pesquisa podem ser agrupados em três eixos principais: viabilidade técnica, viabilidade econômica e contribuições ambientais e sociais.

No eixo viabilidade técnica, os experimentos realizados demonstraram que a qualidade do biogás produzido pela co-digestão de RSOU e esterco suíno desidratado foi similar àquela obtida com o uso de esterco suíno in natura. Os principais parâmetros analisados foram:

- Volume de biogás: não houve diferença estatisticamente significativa no volume total de biogás produzido entre o uso de esterco suíno desidratado e o uso de esterco in natura;
- Concentração de metano (CH₄): a concentração de metano, parâmetro fundamental para a qualidade do biogás, foi praticamente a mesma para ambos os substratos, indicando que a secagem por *spray drying* não comprometeu a eficiência do processo de metanogênese;
- Parâmetros físico-químicos: o controle de variáveis, como pH, temperatura e relação C/N, foi realizado adequadamente, permitindo uma comparação justa entre as duas metodologias.

A adoção do processo de secagem por aspersão (*spray drying*) mostrou-se eficaz para preservar a integridade microbiana essencial ao processo de digestão anaeróbica. Com isso, a secagem do esterco não prejudicou a formação de metano, validando a hipótese de reativação dos microrganismos durante a hidratação no biodigestor.

No aspecto econômico, o uso de esterco suíno desidratado foi avaliado a partir de diversos indicadores econômicos de viabilidade. Os principais destaques foram:

- Redução do volume e peso do esterco: o processo de secagem reduziu o volume do esterco em 74%, possibilitando economia significativa nos custos de transporte e armazenamento. Isso é crucial para a viabilidade de plantas de biogás localizadas distantes das granjas suinícolas.
- Análise de custo-benefício: a pesquisa sugere que o custo adicional associado à secagem por aspersão foi compensado pela economia no transporte e na logística.
- Indicadores financeiros: foram calculados o Valor Presente Líquido (VPL), a Taxa Interna de Retorno (TIR), payback simples, payback descontado e Índice de Rentabilidade (IR) para avaliar a viabilidade econômica. Todos esses indicadores demonstraram a viabilidade financeira do projeto. A pesquisa ainda mostrou que o cenário com financiamento de equipamentos, máquinas, mobiliário e obra civil é mais vantajoso que o investimento desses itens no período zero.

Além das vantagens técnicas e econômicas, a pesquisa contribui para a rentabilidade de usinas de biogás que utilizam os RSOU como substrato. A pesquisa também serve de motivação para que novas usinas possam ser construídas. Consequentemente, uma maior implementação de usinas de biogás para tratar os RSOU e utilizando o esterco suíno desidratado pelo processo de spray drying pode trazer:

- Redução de gases de efeito estufa (GEE): o processo de co-digestão com RSOU e esterco suíno contribui para a mitigação das emissões de metano (CH₄) e dióxido de carbono (CO₂), gases que seriam liberados na decomposição natural dos resíduos sólidos e do esterco;
- Diminuição do volume de resíduos destinados a aterros sanitários: o uso de RSOU em biodigestores reduz a quantidade de resíduos depositados em aterros, colaborando com a gestão de resíduos sólidos urbanos
- Contribuição para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): estar alinhado com vários ODS, especialmente o ODS 7 (Energia Limpa e Acessível), ODS 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) e ODS 12 (Produção e Consumo Sustentáveis).

A pesquisa gerou contribuições significativas para a ciência e para a prática, mas também apontou caminhos para novas investigações:

- Escalabilidade: estudos em escala real (não laboratorial) podem validar os resultados obtidos em condições controladas.
Análise de sensibilidade econômica: avaliar o impacto de flutuações nos preços de transporte, custos de energia e insumos no custo-benefício do uso do esterco desidratado.
- Otimização do processo de spray drying: investigar novos parâmetros operacionais para reduzir o custo do processo de secagem.
Impacto ambiental: estudar os impactos ambientais ao longo do ciclo de vida, desde a produção de esterco até a produção de biogás, com base na análise de ciclo de vida (ACV).
- Diversificação dos substratos: testar a viabilidade de co-digestão de outros resíduos orgânicos urbanos para potencializar a produção de biogás.

A presente tese demonstrou que o uso de esterco suíno desidratado por *spray drying* na co-digestão com RSOU representa uma alternativa tecnicamente viável, economicamente atrativa e ambientalmente sustentável para a produção de biogás. Os benefícios de redução de custos logísticos, melhoria no controle de substratos e aumento na viabilidade de usinas de biogás próximas a grandes centros urbanos reforçam a relevância desta pesquisa para a sociedade.

A combinação de soluções para o manejo de resíduos sólidos urbanos e o uso inteligente do esterco suíno oferece uma solução integrada para os desafios globais de sustentabilidade, especialmente na busca por alternativas de energia limpa e renovável. A partir deste trabalho, espera-se que novas iniciativas no campo de economia circular e bioenergia sejam incentivadas, promovendo práticas mais responsáveis e sustentáveis no manejo de resíduos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABCS. Associação Brasileira de Criadores de Suínos. **Dados da suinocultura brasileira**. 2023. Disponível em: <https://abcs.org.br/> . Acesso em 14 de outubro de 2024.

ABREMA Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil**, 2023 Disponível em: https://abrema.org.br/pdf/Panorama_2023_P1.pdf. Acessado em 14 de outubro de 2024.

ALCÂNTARA, P. B. **Avaliação da influência da composição de resíduos sólidos urbanos no comportamento de aterros simulados**. 364f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007.

ALCAYA, E.; DEMIRER, G. N. Anaerobic mesophilic co-digestion of sugar-beet processing wastewater and beet-pulp in batch reactors. **Renewable Energy**, v.36, p. 971-975, 2011.

ANANDHARAMAKRISHNAN, C.; ISHWARYA, S. P. **Técnicas de secagem por pulverização para encapsulamento de ingredientes alimentícios**. John Wiley & Sons, 2015.

ANANDHARAMAKRISHNAN, C. (Ed.). **Manual de secagem para produtos lácteos**. John Wiley & Sons, 2017.

ANGELIDAKI, I.; TREU, L.; TSAPEKOS, P.; LUO, G.; CAMPANARO, S.; WENZEL; H.; KOUGIAS, P. G. Biogas upgrading and utilization: Current status and perspectives. **Biotechnology Advances**, v. 36, n. 2, p. 452-466, 2018.

ANGELIDAKI, I.; SANDERS, W. Assessment of the anaerobic biodegradability of macro-pollutants. **Reviews in Environmental Science & Biotechnology**, v. 3, p. 117-129, 2004.

APHA. American Public Health Association. **Métodos Padrão para o Exame de Água e Esgoto**. 20ª Edição. American Public Health Association, Baltimore, Maryland, EUA, 2002.

APPELS, L.; LAUWERS, J.; DEGREVE, J.; HELSEN; L.; LIEVENS, B.; WILLEMS, K.; IMPE, J. V.; DEWIL, R. Anaerobic digestion in global bio-energy production: potential and research chal-lenges. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 9, p. 4295-4301, 2011.

ARDOLINO, F.; PARRILLO, F.; ARENA, U. Biowaste-to-biomethane or biowaste-to-energy? An LCA study on anaerobic digestion of organic waste. **Journal of Cleaner Production**, v. 174, p. 462-476, 2018.

BALOTA, E. L.; MACHINESKI, O.; MATOS, M. A. Soil microbial biomass under different tillage and levels of applied pig slurry. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 16, p. 487-495, 2012.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Projetos de referência: Programa de Desenvolvimento de Biogás no Brasil – PROBIOGÁS**, 2020. Disponível em: < <https://antigo.mdr.gov.br/eusou/historias/ArquivosS/probiogas/FolhetoprojetosdereferenciaPROBIOGAS.pdf> . Acessado em 15 de outubro de 2024.

BREALEY, R. A.; MYERS, S. C.; ALLEN F. **Princípios de finanças corporativas**. 8a. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2017.

CALISE, F.; CAPPIELLO, F. L.; CIMMINO, U. C. A.; D'ACCADIA, M. D.; VICIDOMINI, M. Uma revisão do estado da arte da produção de biometano: avanços recentes e integração de energias renováveis. **Energias**, v. 14, n. 16, p. 4895, 2021.

CANTRELL, K. B.; DUCEY, T.; RO, K. S.; CAÇA, P. G. Livestock waste-to-bioenergy generation opportunities. **Bioresource technology**, v. 99, n. 17, p. 7941-7953, 2008.

CBIE – Centro Brasileiro de Infraestrutura. **Perspectivas de energia 2024**. Brasília: CBIE, 2024. Disponível em: < <https://static.poder360.com.br/2024/04/CBIE-Perspectivas-energia-20.pdf> . Acessado em 15 de outubro de 2024.

CHAVES, Y. A. O.; SPRINGER, M. V.; BOLOY, R. A. M.; SOARES, O. M. C. F.; MADEIRA, J. G. F. Performance study of a microturbine system for cogeneration application using biogas from manipueira. **Bioenergy Research**, v. 13, n. 2, p. 659-667, 2020.

CROVADOR, M. I. C. **Potencial de geração de biogás a partir da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos**. 119 f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Bioenergia, área de concentração em Biocombustíveis, Universidade Estadual do Centro - Oeste, Guarapuava - Pr, 2014.

DADASER-CELIK, F.; AZGIN, S. T.; YILDIZ, Y. S. Optimization of solid content, carbon/nitrogen ratio and food/inoculum ratio for biogas production from food waste. **Waste Management & Research**, v. 34, n. 12, p. 1241-1248, 2016.

DA SILVA, E. L.; MENEZES, E. M. **Metodologia da pesquisa e elaboração de dissertação**. UFSC, Florianópolis, 4a. edição, v. 123, n. 4, p. 138, 2005.

DECOTTIGNIES, V.; GALTIER, L.; LEFEBVRE, X; VILLERIO, T. Comparison of analytical methods to determine the stability of municipal solid waste and related wastes. In: **Proceedings** Sardinia, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, 2005.

DEMIREL, B.; SCHERER, P. The roles of acetotrophic and hydrogenotrophic methanogens during anaerobic conversion of biomass to methane: a review. **Reviews in Environmental Science and Biotechnology**, v. 7, p. 173-190, 2008.

DE PAULA, V. R.; DE CARVALHO, A. C. B.; MATOS, A. N.; DA MOTTA, I. G. B.; DA SILVA, G. H.; SANTANA, L. A. R.; OTENIO, M. H. **Desempenho da gestão de resíduos sólidos**: um estudo de caso em uma instituição de pesquisa. 2022.

DHULL, P.; LOHCHAB, R. K.; KUMAR, S.; KUMARI, M. S.; BHANKHAR, A. K. Anaerobic digestion: Advance techniques for enhanced biomethane/biogas production as a source of renewable energy. **BioEnergy Research**, v. 17, n. 2, p. 1228-1249, 2024.

FERREIRA, L. M. S. **Biodigestão anaeróbia de dejetos de bovinos leiteiros com e sem separação da fração sólida**. 2013.

FERRONATO, N.; RAGAZZI, M.; PORTILLO, M. A.; LIZARAZU, E. G. G.; TORRETTA; V. Como melhorar a taxa de reciclagem em grandes cidades em desenvolvimento: Uma abordagem integrada para avaliar cenários de coleta e tratamento de resíduos sólidos municipais. **Desenvolvimento Ambiental**, v. 29, p. 94-110, 2019.

GITMAN, L. J.; ZUTTER, C. J. **Princípios de administração financeira**. 14. ed. São Paulo: Pearson, 2019.

IBRO, M. K.; ANCHA, V. R.; LEMA, D. B. Impactos da co-digestão anaeróbica em diferentes parâmetros de influência: uma revisão crítica. **Sustentabilidade**, v. 14, n. 15, pág. 9387, 2022.

ITO, M.; GUIMARÃES, D. D.; AMARAL, G. F.. Impactos ambientais da suinocultura: desafios e oportunidades. **BNDES Setorial**, v. 44, p. 125-156, 2016. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/9974>. Acessado em 29 de novembro de 2024.

KONZEN, E. A. **Avaliação quantitativa e qualitativa dos dejetos de suínos em crescimento e terminação, manejados em forma líquida**. Belo Horizonte: Escola de Veterinária - UFMG, 1980. 56 p. Tese Mestrado.

KROHN, C.; KHUDUR, L.; DIAS, D. A.; AKKER; B. V. D.; REES, C. A.; CROSBIE; N. D.; SURAPANENI; A.; O'CARROL, D. M.; STUETZ, R. M.; BATSTONE, D. J.; BALL, A. S. O papel da ecologia microbiana na melhoria do desempenho da digestão anaeróbica de lodo de esgoto. **Frontiers in microbiology**, v. 13, p. 1079136, 2022.

LABATUT, R. A.; ANGENENT, L. T.; SCOTT, N. R. Biochemical methane potential and biodegradability of complex organic substrates. **Bioresource Technology**, United States, 102, p. 2255-2264, 2011.

LAVARI, L.; PÁEZ, R.; CUATRIN, A.; REINHEIMER, J.; VINDEROLA, G. Uso de soro de queijo para produção de biomassa e secagem por atomização de lactobacilos probióticos. **Journal of Dairy Research**, v. 81, n. 3, p. 267-274, 2014.

LEHMANN, L. M.; BORZECKA, M.; ZYLOWSKA, K.; PISANELLI; A.; RUSSO, G.; GHALEY, B. B. Avaliações de impacto ambiental de sistemas integrados de produção de alimentos e não alimentos na Itália e na Dinamarca. **Energies**, v. 13, n. 4, p. 849, 2020.

LEHNEN, D. R. **Desenvolvimento de células de combustível microbiana**. 2014.

LI, Y.; CHEN, Z.; PENG, Y.; HUANG, W.; LIU, J.; MIRONOV, V.; ZHANG, S. Insights mais aprofundados sobre os efeitos da seleção da proporção de substrato para inóculo na relação de parâmetros cinéticos, comunidades microbianas e principais vias metabólicas durante a digestão anaeróbica de resíduos alimentares. **Pesquisa sobre Água**, v. 217, pág. 118440, 2022.

MACIEL, F. J. **Geração de Biogás e Energia em Aterro Experimental de Resíduos Sólidos Urbanos**. 2009, 355 f. Tese (Doutorado), Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil/UFPE, Pernambuco, 2009.

MAGALHÃES, G. V. V. **Avaliação da biodigestão anaeróbia de resíduos orgânicos: ensaios de potencial bioquímico de metano (BMP) e projeto piloto de um biodigestor em escala real.** 2018.

MASTERS, K. **Spray drying handbook.** 5. ed. New York: Wiley, 2019.

MATA-ALVAREZ, J.; MACÉ, S.; LLABRES, P. Anaerobic digestion of organic solid wastes. An overview of research achievements and perspectives. **Bioresource Technology**, v. 74, n. 1, p. 3-16, 2000.

MATA-ALVAREZ, J.; DOSTA, J.; ROMERO-GÜIZA, 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.

MITO, J. Y. L.; KERKHOFF, S.; SILVA, J. L. G.; VENDRAME, M. G.; STEINMETZ, R. L. R.; KUNZ, A. **Metodologia para estimar o potencial de biogás e biometano a partir de plantéis suínos e bovinos no Brasil.** 2018.

MUJUMDAR, A. S. **Manual de secagem industrial.** CRC press, 2006.

MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying.** 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

MURTO, M.; BJÖRNSSON, L.; MATTIASSON, B. Impact of food industrial waste on anaerobic co-digestion of sewage sludge and pig manure. **Journal of Environmental Management**, v. 70, n. 2, p. 101-107, 2004.

NANDIYANTO, A. B. D.; OKUYAMA, Kikuo. Progresso no desenvolvimento de métodos de secagem por pulverização para a produção de partículas de morfologia controlada: Das faixas de tamanho nanométrico a submicrométrico. **Advanced Powder Technology**, v. 22, n. 1, p. 1-19, 2011.

NOGUEIRA, C. C. P.; SILVA, I. J. O. **Aplicação de águas residuárias de suinocultura na irrigação.** Thesis, v. 3, n. 6, p. 18-29, 2006.

ORNELAS-FERREIRA, B.; LOBATO, L. C. S.; COLTURATO, L. F. D.; TORRES, E. O.; POMBO, L. M.; PUJATTI, F. J. P.; ARAÚJO, J. C.; CHERNICHARO, C. A. L. Strategies for energy recovery and gains associated with the implementation of a solid state batch methanization system for treating organic waste from the city of Rio de Janeiro-Brazil. **Renewable Energy**, v. 146, p. 1976-1983, 2020.

PAEZ, R.; LAVARI, L.; VINDEROLA, G.; AUDERO, G.; CUATRIN, A.; ZARITZKY, N.; RENHEIMER, J. Effect of heat treatment and spray drying on lactobacilli viability and resistance to simulated gastrointestinal digestion. **Food Research International**, v. 48, n. 2, p. 748-754, 2012.

PATEL, R. P.; PATEL, M. P.; SUTHAR, A. M. Tecnologia de secagem por pulverização: uma visão geral. **Indian Journal of Science and Technology**, v. 2, n. 10, p. 44-47, 2009.

PREFEITURA MUNICIPAL DE SÃO BENTO DO SUL. **Produto 9:** Programa de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos do município de Arraial do Cabo. 2013. Disponível em: < <https://www.pmsbento.com.br>

://pm.wordpress .com/wp-co/envios /2013 /10 /9-c2-produto_pgirs_arra-d-cabo_1013_r0 .pdf.
Acessado em 14 de outubro de 2024.

REDON, E., LORNAGE, R., LAGIER, T., HEBE, I., Measurement and comparison of different stability parameters during a mechanical biological pretreatment before landfilling. In: **Proceedings** Sardinia, Tenth International Waste Management and Landfill Symposium, 2005.

REGAZI, C. C. D.; DE ALMEIDA, G. R.; DE SOUZA, H. T.; LIMA, M. G. S.; LIMA JUNIOR, R. G. S.; DE FARIA, S. T. Efeitos da relação carbono/nitrogênio na produção de biogás proveniente de resíduos sólidos orgânicos urbanos. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 9, p. 87033-87044, 2021.

ROSS, S. A.; WESTERFIELD, R. W.; JORDAN, B. D.; LAMB, R. **Fundamentos de Administração Financeira**. 9. ed. São Paulo: Bookman, 2016.

SARDÁ, L. G.; HIGARASHI, M. M.; MULLER, S.; OLIVEIRA, P, A.; COMIN, J. J. Redução da emissão de CO₂, CH₄ e H₂S através da compostagem de dejetos suínos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 14, p. 1008-1013, 2010.

TANG, Z.; LY, S.; WANG, Y.; HUANG, C. Y.; LUO, J.; FU, C. Biofuel trigeneration with energy storage for heating, cooling and power on farms. **Energy Reports**, v. 7, p. 5394-5405. nov. 2021.

TCHOBANOGLIOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S. (Ed.). **Gestão integrada de resíduos sólidos: princípios de engenharia e questões de gestão**. 1993.

VIVAN, M.; KUNZ, A.; STOLBERG, J.; PERDOMO, C.; TECHIO; V. H. **Eficiência da interação biodigestor e lagoas de estabilização na remoção de poluentes em dejetos de suínos**. Efficiency of biodigester and stabilization pond interaction in removal of swine manure pollutants. 2010.

WEILAND, P. Biogas production: current state and perspectives. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 85, p. 849-860, 2010.

ZANK, J. C. C.; BRANDT, L. S.; BEZERRA, R. C.; PEREIRA, E. N. As características do biogás e avaliação de substituição de combustíveis. **Exacta**, v. 18, n. 3, p. 502-516, 2020.