



Universidade Federal do Rio de Janeiro  
Escola Politécnica & Escola de Química  
Programa de Engenharia Ambiental

**TAYANE MIRANDA SILVA DE CASTRO**

**AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DE LODO SECUNDÁRIO EM  
REFINARIAS DE PETRÓLEO**

**RIO DE JANEIRO**

**2019**



UFRJ

Tayane Miranda Silva de Castro

**AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DE LODO SECUNDÁRIO EM  
REFINARIAS DE PETRÓLEO**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientadores: Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco  
Magali Christe Cammarota

Rio de Janeiro

2019

Castro, Tayane Miranda Silva de.  
Avaliação do tratamento e destinação de lodo secundário em refinarias  
de petróleo / Tayane Miranda Silva de Castro. – 2019.  
110 f.: il. 30 cm.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) –  
Escola Politécnica & Escola de Química, Universidade Federal  
do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.  
Bibliografia: 110f. 98-110.

Orientadores: Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco e  
Magali Christe Cammarota

1. Resíduos Sólidos. 2. Lodos ativados. 3. Digestão anaeróbia. 4.  
Matriz SWOT. I. Pacheco, Elen Beatriz Acordi Vasques e Cammarota,  
Magali Christe. II. UFRJ. III. Avaliação do tratamento e destinação do  
lodo secundário do refino de petróleo.



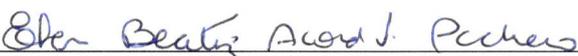
UFRJ

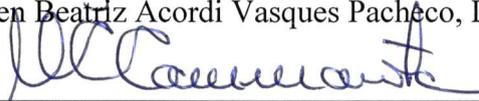
Tayane Miranda Silva de Castro

AVALIAÇÃO DO TRATAMENTO E DESTINAÇÃO DE LODO SECUNDÁRIO EM  
REFINARIAS DE PETRÓLEO

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica & Escola de Química, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Ambiental.

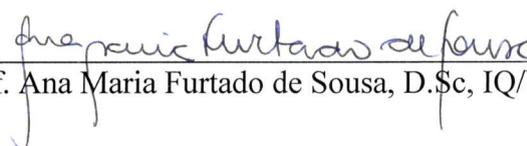
Aprovada pela Banca:

  
Orientadora: Prof. Elen Beatriz Acordi Vasques Pacheco, D.Sc, IMA/UFRJ

  
Orientadora: Prof. Magali Christe Cammarota, D.Sc, EQ/UFRJ

  
Prof. Selma Gomes Ferreira Leite, D.Sc, EQ/UFRJ

  
Prof. Ana Lucia Nazareth da Silva, D.Sc, IMA/UFRJ

  
Prof. Ana Maria Furtado de Sousa, D.Sc, IQ/UFRJ

Rio de Janeiro  
2019

*Aos que me seguraram as mãos para que eu  
pudesse chegar até aqui.*

## AGRADECIMENTOS

Para uma pessoa de pouca demonstração de sentimentos como eu (mas acredito que estou melhorando!) esta, com certeza, é uma das partes mais complicadas. Mas apesar de não ser uma pessoa muito boa com as palavras, a gratidão é mais do que necessária neste momento. É justa! Por todos os anjos que passaram no meu caminho e possibilitaram da forma que estive ao seu alcance que esta dissertação fosse possível. Portanto, eu os agradeço:

À Deus, por não me permitir desistir. Que cuidou que tudo ao meu redor fosse favorável, em particular na reta final e que colocou no caminho pessoas incríveis. Iluminando minhas ideias e trazendo inspiração para escrita nas horas mais difíceis.

Minha orientadora Magali que foi mais que uma professora nesta dissertação. Que há oito anos atrás me deu a oportunidade de iniciar um ciclo de diversas etapas e que se encerra com este documento. Com você tive o privilégio de trabalhar, estudar e aprender muito. Certamente, mudou minha vida. Que sempre demonstrou muita confiança em mim e nos trabalhos que desenvolvemos. Um exemplo de profissional que certamente tem “o dom” para a orientação. Agradeço sua disponibilidade, confiança e carinho de sempre. Sou eternamente grata.

Minha orientadora Elen que abraçou a ideia desta dissertação com carinho e disponibilidade. Não mediu esforços para me ajudar, sempre que foi preciso. Me acalmou em momentos difíceis e me deu um norte quando eu achava que os prazos não seriam possíveis com incentivo e força. Eu fui muito sortuda em termos de orientação. As duas são as maravilhosas!

À minha família, meus pais Márcia e Hélio e ao meu irmão Marcus. Costumo dizer que fui criada para mundo e isto é incrível! Vocês me deram a força para me tornar a mulher que sou, me deram tudo. Obrigada! Minha mãe, que nos momentos de dor e desespero chora comigo (primeiro que eu), sempre me incentivava, me fala para acreditar e cuida de mim com todo amor e carinho do mundo principalmente quando a correria da vida não deixa nem eu mesma me cuidar; meu pai que se preocupa, principalmente com minha segurança a todos os momentos – quando eu saía tarde do fundão então - e que se ele pudesse escolher tenho certeza que estaria do meu lado sempre, tentando diminuir minha carga diária. E o meu eterno irmãozinho (bem maior que eu já há algum tempo) por me ensinar todos os dias o significado da palavra orgulho. Por me permitir fazer parte da sua história, por confiar em mim, me ouvir (nem sempre) e claro por fazer parte das suas conquistas que estão só começando. Também a minha vó e tias por todo carinho desde de sempre e perdoem-me não estar tão perto quando gostaria. Amo vocês.

Ao meu namorado, Jonnatan Souza, por ser meu parceiro, cúmplice e meu melhor amigo. Já faz um tempo que aprendeu a lidar com minhas loucuras, crises e falta de tempo, mas sempre com compreensão, incentivo, carinho e amor. Tenho orgulho de nós e de tudo que passamos juntos (e ainda temos muito a passar). Obrigada especialmente pela sensibilidade com lidar com meu nervosismo e cansaço nesta reta final. Você é a pessoa que mais de perto sabe de todo o caminho percorrido para que eu esteja aqui hoje. Obrigada por estar na minha vida e não me deixar esmorecer. Te amo!

À Verônica Marinho, por ser mais uma vez uma pessoa tão importante na minha vida que me falta espaço para agradecer. Por ser mais uma vez a pessoa que mais me ajudou ao longo destes anos, tanto na vida profissional como com sua amizade. Eternamente a melhor chefe do mundo! Você é um dos meus maiores exemplos e te admiro demais. Além de ajuda com a dissertação em si, obrigada pelo planejamento e outros pontos. Obrigada por ter paciência todas as vezes que “travei” em me ouvir, em ser presente. Obrigada por ter aberto as portas da sua casa para mim neste momento crucial (E permitir este abuso meu! Que me ajudou demais!!!). Você, junto

com a Luana, foi e é meu apoio emocional. Nós três tão diferentes, mas tão iguais, fico muito feliz pelo que a nossa amizade se tornou, de tantos papos cabeça, tantas trocas de aprendizado, tantos chopes, tantos lamentos, choros e sorrisos. Lu, e você com esta sua alegria, evolução espiritual, energia... Amo tanto vocês (três cavalinhos correndo agora – piada interna).

Aos meus colegas do laboratório de tecnologia ambiental (LTA), muitos passaram, não só durante a dissertação, mas em todos estes anos que trabalhei/ estudei no LTA, vocês são inesquecíveis. Saudades Claudia, do dia a dia e todo aprendizado que você me proporcionou! Eduardo, você deve estar feliz de não precisar mais aguentar eu te perturbando todos os dias (brincadeira!). Obrigada pela sua amizade, companheirismo e pelas muitas vezes que me salvou, até quando eu não estava mais presente no laboratório. Obrigada pela análise de metano e desculpa não ter sido usada, quanto trabalho! Obrigada por ser uma cara de coração incrível e bondoso. Não poderia deixar de agradecer aos meus primeiros estagiários, Hudson e Pedro, foi gratificante poder contribuir um pouquinho com a formação de vocês. Obrigada por toda a ajuda, por colocar a mão na massa, literalmente, e tudo que fizeram diretamente por mim e por esta dissertação. Também ao Vinícius, Fran, Helena, Lorena, Juliana e tantos outros que tive o prazer de trabalhar ajudar e ser ajudada! Sou grata a todos vocês.

Aos meus colegas de trabalho e gestores da PETROBRAS DISTRIBUIDORA S.A. (GVPET), gostaria de agradecer a todos principalmente pela compreensão! Paul e Barbeiro, não tenho palavras para descrever o carinho, cuidado e incentivo de vocês. Foi surpreendente que com tão pouco tempo de empresa eu pudesse ser tão apoiada neste momento conturbado. Aos PVs, Filipe, Ilídio e Érico que principalmente neste último mês de dissertação trabalhei diretamente e foram nota 10, além de compreender, senti que torceram por mim e se preocuparam se tudo estava dando certo constantemente. Ronan, que além de tudo já citado, agradeço pelos almoços e conversas. Ao Thalles, que eu conheci nas disciplinas deste mestrado, pela confiança e pelo convite para trabalhar na BR, propiciando esta experiência profissional desafiadora. E ao Alex e Aline, por me suprirem nas minhas ausências com dedicação. Muito obrigado!

Ah meus amigos (resistentes amigos), que apesar de eu ser uma furona e muitas vezes uma péssima amiga vocês dentre outros não desistem de mim. Aqui vai documentada uma promessa, vou melhorar! Vou estar mais perto e tentar parar de marcar saídas só com tanta antecedência. Prometo a me comprometer com menos tarefas fixas (pelo menos este ano - risos) e cuidar de cultivar o carinho que tenho por vocês. Dentre outros amigos amados, minhas amigas de anos e anos, Joyce e Bias; meu amigo de faculdade, Eliezer; meu gêmeo que a vida deu Davi; e minha amiga bem oposta, Evelyn provavelmente vocês estão tão ansiosos quanto eu para este fim. Logo estarei de volta, obrigada por toda alegria, paciência e torcida!

Ao Programa de Engenharia Ambiental (PEA), pela oportunidade de fazer este curso, por todo o corpo docente, coordenação, que me deram as ferramentas para o aprendizado. Uma das melhores partes deste mestrado foi a troca de ideias, networking e o conhecimento adquirido nas disciplinas, foi enriquecedor.

Ao LTA, Escola de química, Escola Politécnica e UFRJ, pelo local e estrutura cedida para realização deste estudo e por todos os anos que jamais serão esquecidos.

À PETROBRAS/Cenpes e ao PRH-ANP/MCT, pelo material cedido para o estudo e apoio prestado.

A todos, mais uma vez muito obrigada! Cada um citado, dentre tantos outros, tornaram esta jornada um pouco menos árdua. Sozinha eu não conseguiria. Esta conquista também é de vocês!

*“Eu trabalhei duro por um longo tempo, mas não se trata de vencer. Isto é sobre não desistir. ”*

*(Lady Gaga)*

*“Quando estamos à beira da loucura, no limite da resistência, ocorrem mudanças significativas na nossa maneira de interpretar a vida. ”*

*(Rodrigo de Carvalho)*

*“And I try, oh my god do I try  
I try all the time, in this institution*

*And I pray, oh my god do I pray  
I pray every single day  
For a revolution”*

*(4 Non Blondes – What’s up)*

## RESUMO

CASTRO, Tayane Miranda Silva de. **Avaliação do tratamento e destinação de lodo secundário em refinarias de petróleo.** Rio de Janeiro, 2019. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

O petróleo ainda será a fonte de energia mais usada nas próximas décadas, mesmo com a inclusão das energias renováveis na matriz energética mundial. Portanto, as refinarias de petróleo continuarão suas atividades altamente poluidoras, gerando resíduos sólidos de alta complexidade, que requerem tratamento e disposição adequados. Dentre estes resíduos, destacam-se os lodos secundários gerados na etapa biológica (sistemas de lodos ativados) do tratamento de efluentes das refinarias. Usualmente, após uma etapa de desaguamento, para redução de volume e umidade, estes lodos são encaminhados para disposição em aterros industriais ou para queima em incineradores, seguida de disposição das cinzas em aterros. O presente estudo tem como objetivo geral avaliar a utilização da tecnologia de digestão anaeróbia (DA) para tratamento destes lodos secundários antes de sua disposição final, através de levantamento de dados secundários e da ferramenta de gestão Matriz SWOT, que elenca forças, fraquezas, oportunidades e ameaças. No levantamento dos métodos de tratamento e destinação aplicáveis aos lodos secundários verificou-se que a DA não é utilizada, embora seja considerada uma tecnologia madura. Na análise SWOT a DA se mostrou favorável frente a outras tecnologias aplicadas ao tratamento de lodo, com muitos dos fatores analisados sendo positivos. Também foi possível avaliar benefícios e dificuldades da DA aplicando-se uma valoração, considerando sua aderência à sustentabilidade (definida através de critérios). Para validar experimentalmente o resultado apontado na matriz SWOT, obtida a partir de dados secundários, foram realizados experimentos em escala de bancada que comprovaram a possibilidade de aplicação da digestão e da codigestão anaeróbia no tratamento de lodos secundários de refinaria. Dentre os resultados, destacam-se valores obtidos na melhor condição experimental: 52% de remoção de sólidos voláteis (SV) e 81 mL biogás/g SV<sub>aplicados</sub> para a produção específica de biogás. Tais resultados foram alcançados, por meio de um planejamento experimental, na codigestão de lodo secundário residual (sem desaguamento prévio) e resíduo alimentar na proporção 80:20 (% v/v), sem adição de inóculo, após 45 dias a 35°C. Na comparação teórico-experimental cerca de 60% dos fatores foram confirmados experimentalmente, concluindo-se que a DA deve ser considerada para o tratamento de lodos secundários gerados em refinarias, especialmente em mistura com outros resíduos facilmente biodegradáveis, como o resíduo alimentar avaliado.

**Palavras-chave:** Refinaria de petróleo, resíduos sólidos, lodo secundário, digestão anaeróbia, análise SWOT.

## ABSTRACT

CASTRO, Tayane Miranda Silva de. **Avaliação do tratamento e destinação de lodo secundário em refinarias de petróleo.** Rio de Janeiro, 2019. Dissertação (Mestrado) – Programa de Engenharia Ambiental, Escola Politécnica e Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2019.

Despite the inclusion of renewable energy in the global energy matrix, petroleum will continue to be the most widely used energy source in the coming decades. Petroleum refineries will therefore continue their pollution-generating activities, producing highly complex solid waste that requires adequate treatment and disposal. This includes the secondary sludge generated in the biological stage (System Activated Sludge) of refinery wastewater treatment. The sludge is typically sent to industrial landfills after dewatering to reduce volume and humidity, or burned in incinerators and the ash disposed of in landfills. The present study aims to evaluate the use of anaerobic digestion (AD) technology for the treatment of secondary sludge before final disposal, through secondary data collection and SWOT analysis (strengths, weaknesses, opportunities and threats). A survey of treatment and disposal methods for secondary sludge found that AD is not used, despite being considered a mature technology. In the SWOT analysis, AD was more beneficial than other technologies for sludge treatment, with positive outcomes for several of the factors analyzed. Additionally, the benefits and difficulties of AD were assessed by applying a valuation, considering its adherence to sustainability (defined based on specific criteria). Bench-scale experiments were carried out to validate the SWOT analysis results, obtained from secondary data, demonstrating the viability of using of anaerobic digestion and co-digestion to treat secondary refinery sludge. The best results obtained under experimental conditions were 52% volatile solids (VS) removal and 81 mL of biogas / g (VS) applied for specific biogas production. This was achieved using an experimental design, involving co-digestion of secondary sludge (without prior drainage) and leftover food at a ratio of 80:20 (% v/v), without adding inoculum, for 45 days at 35°C. In the theoretical-experimental comparison, about 60% of the factors were confirmed experimentally, demonstrating that AD is a viable alternative for treating secondary sludge generated in refineries, especially when combined with other easily biodegradable wastes, such as leftovers.

Keywords: Petroleum refinery, solid waste, secondary sludge, anaerobic digestion, swot analysis.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Série histórica da produção de petróleo nacional e mundial .....	16
Figura 2- Participação do petróleo na oferta energética brasileira. ....	17
Figura 3- Etapas da cadeia produtiva do petróleo .....	17
Figura 4- Sistema simplificado do processo de lodos ativados. ....	22
Figura 5- Ordem preferencial do gerenciamento dos resíduos sólidos .....	26
Figura 6- Detalhamento sobre os constituintes da sustentabilidade. ....	32
Figura 7- Exemplo de Matriz SWOT. ....	34
Figura 8- Matriz SWOT Cruzada .....	36
Figura 9- Sequência metodológica da dissertação. Fonte: Elaboração própria. DA = digestão anaeróbia, LR = lodo secundário de refinaria, RA = resíduo alimentar. ....	41
Figura 10- Classificação do índice de Favorabilidade .....	47
Figura 11- Amostra de lodo aeróbio de refinaria recebido no laboratório e empregado no estudo	48
Figura 12- Frascos penicilina com seringa acoplada para quantificação do biogás produzido. ....	50
Figura 13- Etapas de obtenção do resíduo alimentar: (a) Resíduo orgânico alimentar domiciliar recebido no laboratório; (b) resíduo segregado manualmente; (c) trituração do resíduo; (d) resíduo alimentar obtido após trituração; (e) e (f) resíduo alimentar para armazenamento. ....	51
Figura 14- Matriz SWOT da digestão anaeróbia. ....	57
Figura 15- Características que influenciam no peso dos critérios de sustentabilidade. ....	58
Figura 16- Valorações de importância das Forças da tecnologia de digestão na análise SWOT. ...	58
Figura 17- Valorações de importância das Fraquezas da tecnologia de digestão na análise SWOT. ....	61
Figura 18- Valorações de importância das Oportunidades da tecnologia de digestão na análise SWOT. O1= Comercialização do biogás, O2- Digerido usado nos solos, O3= Crédito de carbono, O4= Custo da disposição final, O5= Combinações de resíduos, O6= Legislação internacional e O7= Restrições de localização. ....	62
Figura 19- Valorações de importância das Ameaças da tecnologia de digestão na análise SWOT. T1= Tipo de material, T2=Condições climáticas, T3= Legislação específica e T4= Vazamentos e explosões .....	65
Figura 20- Resultado do cruzamento de fatores da matriz SWOT. ....	67
Figura 21- Volume de biogás (35°C, 1 atm) acumulado nos ensaios de digestão anaeróbia com diferentes conteúdos de lodo de refinaria e inóculo (Etapa 1). ....	72
Figura 22- Volume de biogás (35°C, 1 atm) acumulado nos ensaios de digestão anaeróbia com diferentes conteúdos de lodo de refinaria diluído e inóculo (Etapa 2). ....	75
Figura 23- Volume de biogás (35°C, 1 atm) acumulado nos ensaios de digestão anaeróbia do RA sem e com adição de inóculo (I/S 2). ....	81
Figura 24- Remoção de SV e PEB nos ensaios de codigestão anaeróbia na etapa 4. ....	83
Figura 25- Diagrama de Pareto do planejamento experimental. X1 = I/S, X2 = % de RA e X3 = diluição. ....	84
Figura 26- Gráficos de superfície de resposta obtidos no planejamento experimental. X1 = I/S, X2 = % de RA e X3 = diluição. (a) o cruzamento entre as variáveis X1 e X2; (b) relação entre as variáveis X2 e X3; (c) relação entre as variáveis X3 e X1. ....	85

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Capacidade de Refino no Brasil em 2017. ....	18
Tabela 2- Geração de efluentes e volume refinado .....	21
Tabela 3- Resumo de condições recomendadas para avaliação do Potencial Bioquímico de Metano por diferentes autores. ....	28
Tabela 4- Alguns artigos que trabalharam com SWOT e gerenciamento de resíduos sólidos de 2006 a 2018 .....	38
Tabela 5- Definições dos elementos da matriz SWOT.....	42
Tabela 6- Critérios de Sustentabilidade adotados para análise dos resultados na matriz SWOT. ....	44
Tabela 7- Pontuação utilizada nos critérios de avaliação. ....	46
Tabela 8- Condições experimentais avaliadas nos ensaios de digestão anaeróbia do LR.....	49
Tabela 9 - Condições experimentais avaliadas nos ensaios de digestão anaeróbia do RA. ....	52
Tabela 10- Codificação e definição dos níveis a serem estudados no planejamento de experimentos fatorial completo 2 <sup>3</sup> do planejamento experimental .....	52
Tabela 11- Corridas experimentais realizadas no planejamento experimental 2 <sup>3</sup> .....	53
Tabela 12- Análises realizadas e seus respectivos métodos analíticos.....	54
Tabela 13- Somatório da valoração dos elementos e % na matriz SWOT sobre a digestão anaeróbia para lodos de refinaria. ....	66
Tabela 14- Caracterização físico-química do lodo secundário de refinaria. ....	70
Tabela 15- Caracterização do lodo anaeróbio empregado como inóculo nos ensaios de digestão anaeróbia.....	71
Tabela 16- Resultados dos ensaios de digestão anaeróbia conduzidos na Etapa 1 .....	73
Tabela 17- Resultados dos ensaios de digestão anaeróbia conduzidos na Etapa 2. ....	76
Tabela 18- Percentual de diferentes componentes do Resíduo Alimentar .....	78
Tabela 19- Caracterização físico-química do resíduo alimentar .....	79
Tabela 20- Resultados dos ensaios de digestão anaeróbia do RA sem e com adição de inóculo (I/S 2).....	82
Tabela 21- Resultados dos ensaios de codigestão anaeróbia no planejamento experimental. .	82
Tabela 22- Resultados obtidos na Análise de variância. ....	84
Tabela 23- Quantidade de elementos confirmados, refutados e inconclusivos para aplicação da SWOT para o LR.....	86
Tabela 24- Remoção de ST (massa de resíduo) em cada condição da etapa experimental (%) .....	91

## LISTA DE SIGLAS

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
AGV	Ácidos Graxos Voláteis
ALC.	Alcalinidade
ANP	Agência Nacional de Petróleo
ANOVA	Análise de Variância
APHA	<i>American Public Health Association</i>
API	<i>American Petroleum Institute</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Material</i>
BEN	Balanco Energético Nacional
BMP	<i>Biochemical Methane Potential</i>
C/N	Razão Carbono/Nitrogênio
C/P	Razão Carbono/ Fósforo
CG	Cromatógrafo de fase gasosa
CH <sub>4</sub>	Metano
CS	Critério de Sustentabilidade
DA	Digestão Anaeróbia
EIA	Estudo de Impacto Ambiental
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FASF	Fábrica de Asfalto
GEEs	Gases de efeito estufa
I	Inóculo
IF	Índice de Favorabilidade
I/S	Razão inóculo-substrato
IPPS	<i>Industrial Pollution Projection System</i>
LR	Lodo de Refinaria
LUBNOR	Fábrica de Lubrificantes do Nordeste
MDL	Mecanismo de desenvolvimento limpo
MMA	Ministério do Meio Ambiente
MME	Ministério de Minas e Energia
NBR	Norma brasileira regulamentadora
O&G	Óleos e graxas
PEB	Produção Específica de Biogás
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
RA	Resíduo Alimentar
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
S	Substrato
SAO	Separador água-óleo
ST	Sólidos Totais
SV	Sólidos Voláteis
SWOT	<i>Strengths, Weakness, Opportunities e Threats</i>
UASB	<i>Upflow Anaerobic Sludge Blanket</i>
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO.....</b>	<b>13</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>16</b>
2.1. A indústria de petróleo e a etapa de refino .....	16
2.2. Resíduos sólidos gerados nas refinarias .....	19
2.3. Origem, tratamento e disposição do lodo do tratamento de efluentes de refinarias .....	20
2.4. Gerenciamento de resíduos sólidos e suas perspectivas.....	24
2.5. O processo de digestão anaeróbia .....	26
2.6. O processo de codigestão anaeróbia .....	29
2.7. Matriz SWOT e sua aplicação a resíduos.....	32
<b>3. METODOLOGIA .....</b>	<b>40</b>
3.1. Metodologia de pesquisa.....	41
3.2. Avaliação da digestão anaeróbia por análise SWOT.....	42
3.3. Avaliação experimental da digestão e codigestão de lodo de refinaria .....	47
3.3.1. Amostragem e caracterização do lodo de refinaria .....	47
3.3.2. Ensaios de digestão anaeróbia do lodo .....	48
3.3.3. Amostragem e caracterização do resíduo alimentar.....	50
3.3.4. Ensaios de digestão anaeróbia do resíduo alimentar .....	51
3.3.5. Ensaios de codigestão anaeróbia de lodo de refinaria e resíduo alimentar: Planejamento experimental .....	52
3.3.6. Métodos analíticos .....	54
3.4. Reavaliação da matriz SWOT a partir de dados primários da digestão anaeróbia.....	55
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>56</b>
4.1. Matriz SWOT da digestão anaeróbia: avaliação teórica.....	56
4.2. Avaliação experimental .....	69
4.2.1. Caracterização do lodo de refinaria .....	69
4.2.2. Caracterização do inóculo.....	70
4.2.3. Digestão anaeróbia de lodo de refinaria – Experimental .....	71
4.2.4. Caracterização do resíduo alimentar .....	78
4.2.5. Digestão anaeróbia do resíduo alimentar .....	80
4.2.6. Codigestão anaeróbia de lodo de refinaria e resíduo alimentar: Planejamento Experimental.....	82
4.3. Reavaliação da matriz SWOT a partir de dados primários da digestão anaeróbia. ....	86
<b>5. CONCLUSÕES .....</b>	<b>95</b>
<b>6. SUGESTÕES .....</b>	<b>97</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>98</b>

## 1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

Óleo e gás são, atualmente, as principais fontes de energia e receita em diversos países. Este setor é uma importante atividade industrial no século XXI e certamente os impactos ambientais causados assumem também alto grau de importância.

Dentro de toda a cadeia produtiva do petróleo, a etapa de refino não é importante apenas do ponto de vista estratégico, mas também do ponto de vista ambiental. Refinarias de petróleo são grandes instalações industriais, geralmente próximas a zonas urbanas, que usam grande quantidade de água e geram gases tóxicos, efluentes e resíduos sólidos de difícil tratamento e disposição. Estima-se que custos adicionais relativos ao controle ambiental variam de 15 a 20% do investimento total de uma refinaria. Porém, tais custos não devem ser vistos como somente um custo a mais de projeto, mas como um investimento na variável ambiental, que assume um papel cada vez mais importante no planejamento e concepção das refinarias (MARIANO, 2005).

Nas refinarias de petróleo são gerados resíduos sólidos durante as diversas etapas do processo de refino e também durante o tratamento dos efluentes gerados. Os principais resíduos gerados nas refinarias são: o lodo dos separadores água / óleo (SAO), o lodo dos flutuadores, as borras de fundo dos tanques de armazenamento do petróleo cru e derivados, as argilas de tratamento, os lodos biológicos e alguns sólidos contaminados com óleo. Estes resíduos podem variar significativamente quanto às suas características físico-químicas, tóxicas e seu efetivo potencial poluidor de acordo com o tipo de petróleo que é processado e os processos empregados nas refinarias (ARAÚJO; NICOLAIEWSKY; FREIRE, 2003; MARIANO, 2005).

A quantidade total de resíduos gerados nas refinarias de petróleo é pequena, quando comparada ao volume de petróleo processado, na faixa de 0,01 a 2 kg por tonelada de petróleo. O lodo secundário dos sistemas de lodos ativados, normalmente empregados no tratamento de efluentes das refinarias, representa somente de 1 a 2% do volume de efluente tratado. Mas, devido à elevada vazão dos efluentes processados, em números absolutos pode-se atingir 21 toneladas mensais de lodo secundário por refinaria (MARIANO, 2005). Entende-se que o tratamento do lodo secundário não faz parte do processo de lodos ativados em si; no entanto, é um complemento essencial. Estes resíduos precisam ser gerenciados, tratados e ter uma destinação correta.

A análise técnica da tecnologia selecionada para o tratamento de resíduos é importante e a avaliação quanto a sua sustentabilidade pode viabilizar ainda mais a forma de tratamento selecionada. Uma das ferramentas práticas que pode ser usada para auxiliar a avaliação do tratamento mais sustentável e que permite um planejamento estratégico é a análise SWOT (Strengths, Weaknesses, Opportunities e Threats), que considera as forças, oportunidades, ameaças e fraquezas da tecnologia analisada e facilita o entendimento das situações externas e internas. Originalmente foi desenvolvida para organizações e empresas, nas quais ajuda a direcionar seus recursos e capacidades para atingirem seus objetivos (FERRELL e HARTLINES, 2012).

Ainda, na busca de uma perspectiva sustentável para a indústria do petróleo e gás natural, além de se requerer um cuidado maior com as práticas de proteção ambiental e mitigação dos efeitos dos resíduos no meio ambiente, ao longo da cadeia de produção, processamento e consumo, é importante que se considerem as possibilidades de transição para fontes energéticas menos poluentes e sustentáveis. Uma destas alternativas é a utilização do processo de digestão anaeróbia, pois neste ocorre a conversão da matéria orgânica biodegradável do resíduo a biogás, cujo conteúdo de metano (CH<sub>4</sub>) pode ser aproveitado na indústria de petróleo como fonte de energia, na geração de calor ou eletricidade (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; METCALF e EDDY, 2014).

A digestão anaeróbia ocorre em reatores fechados, chamados digestores anaeróbios, muito utilizados no tratamento de lodos primários e secundários de plantas de tratamento de esgoto de grande porte. Logo, pode ser utilizada como tratamento do lodo secundário gerado em refinarias (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; FOLADORI; ANDREOTTOLA; ZIGLIO, 2010).

De modo a reduzir custos e atender a uma legislação mais restrita, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) recomenda o estudo de técnicas não convencionais de gerenciamento dos resíduos e até mesmo soluções sinérgicas para a questão ambiental.

O uso de outros resíduos combinados com o resíduo principal deste estudo (lodo secundário dos sistemas de lodos ativados) pode aumentar os benefícios do tratamento, além de tratar no mesmo processo dois resíduos que seriam descartados. Este é o caso do tratamento por codigestão anaeróbia, que usa dois ou mais resíduos no tratamento e que tem como produto o biogás. A codigestão, se realizada com diferentes resíduos do mesmo empreendimento, pode

reduzir custos e otimizar o tratamento, como por exemplo a incorporação do resíduo alimentar gerado nos restaurantes das refinarias ao lodo gerado na etapa de refino.

Portanto, o objetivo geral do trabalho foi avaliar a utilização da tecnologia de digestão anaeróbia para tratamento dos lodos secundários gerados nos sistemas de lodos ativados de refinarias de petróleo antes de sua disposição final, através de levantamento de dados secundários e aplicação da ferramenta de gestão Matriz SWOT e dados primários através de análise experimental.

Para atingir tal objetivo foram delineadas as seguintes etapas de trabalho:

- Levantamento, com base em dados secundários, da utilização da digestão anaeróbia no tratamento e destinação dos resíduos sólidos através da ferramenta matriz SWOT;
- Avaliação da tecnologia de digestão e codigestão anaeróbia, em escala de laboratório, para tratamento do lodo secundário e obtenção de dados primários;
- Realização de análise comparativa entre a matriz SWOT da digestão anaeróbia com os resultados obtidos a partir da análise experimental da digestão e codigestão aplicados ao lodo secundário oriundo de sistemas de lodos ativados de refinarias de petróleo.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. A indústria de petróleo e a etapa de refino

Apesar dos esforços para inclusão das energias renováveis na matriz energética mundial, o petróleo continua sendo a maior fonte de energia e estima-se que perdurará pelos próximos anos. Mesmo que seja uma fonte de energia não-renovável, com as novas tecnologias para as descobertas e viabilidade de prospecção em condições mais extremas, todos os dias são encontrados novos campos petrolíferos e atualmente chega-se à marca de 1,7 trilhões de barris em reservas mundiais provadas (ANP, 2018).

Mesmo com a crise do petróleo entre 2014 e 2016, com os preços do barril caindo em mais da metade do seu valor de mercado e chegando a U\$\$ 43,3 (menor valor dos últimos 10 anos), o setor está se recuperando, com volumes e valores em tendência crescente. A produção de petróleo mundial e nacional cresceu pelo quarto ano consecutivo, tendo a produção nacional apresentado um aumento de 4,2% em 2017, atingindo 2,7 milhões de barris/dia (Figura 1). Este volume corresponde a 3% da produção mundial, fazendo com que o Brasil ocupe a 10ª posição entre os maiores produtores. Esta elevação foi liderada pelo pré-sal, com a oferta de petróleo em águas profundas e de alto °API, que alcançou a média de 1,3 milhão de barris/dia no ano. Esta fonte corresponde a cerca de 50% da produção do País e aumentou a média da densidade e a qualidade do petróleo brasileiro (ANP, 2018; FGV, 2017).

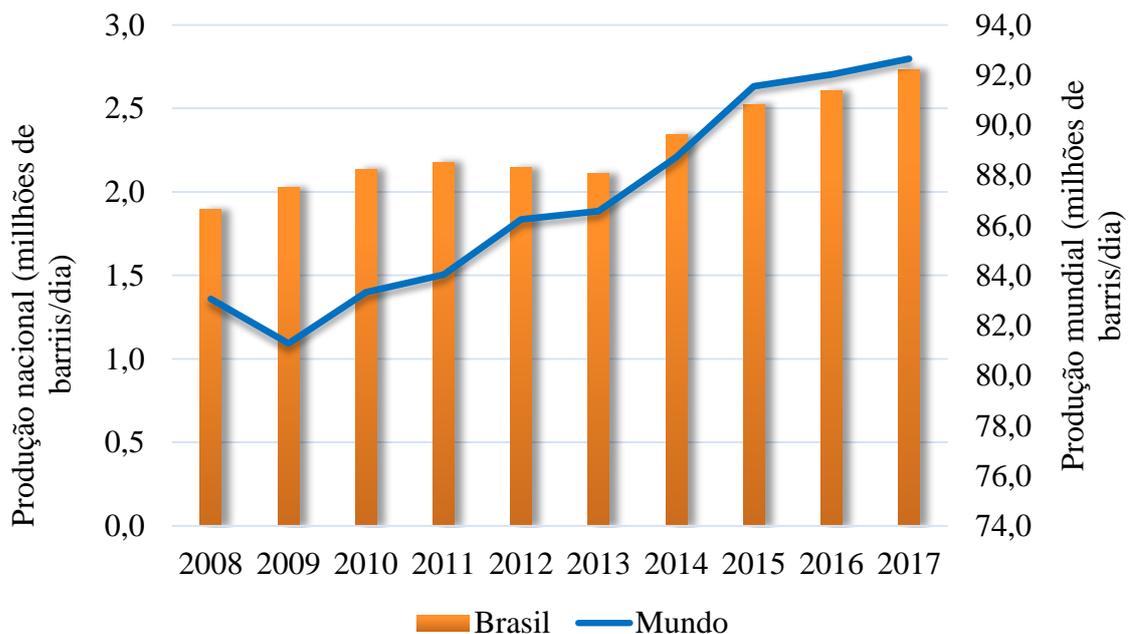


Figura 1- Série histórica da produção de petróleo nacional e mundial  
 Fonte: BP Statistical Review of World Energy, 2018 apud ANP (2018)

Este cenário favorável ao petróleo reflete na oferta e consumo da energia no Brasil. Segundo o Balanço Energético de 2018, o petróleo e seus derivados predominam na matriz energética brasileira, representando 37% dos derivados de petróleo, enquanto a maior fonte de energia renovável, a biomassa de cana, representa 17% (Figura 2). Mesmo com esta grande diferença, o Brasil é um dos países com maior diversidade e percentuais de energia renovável na matriz energética, atualmente com 42,9% de energia limpa, enquanto a média mundial é de 13,7% (EPE, 2018).

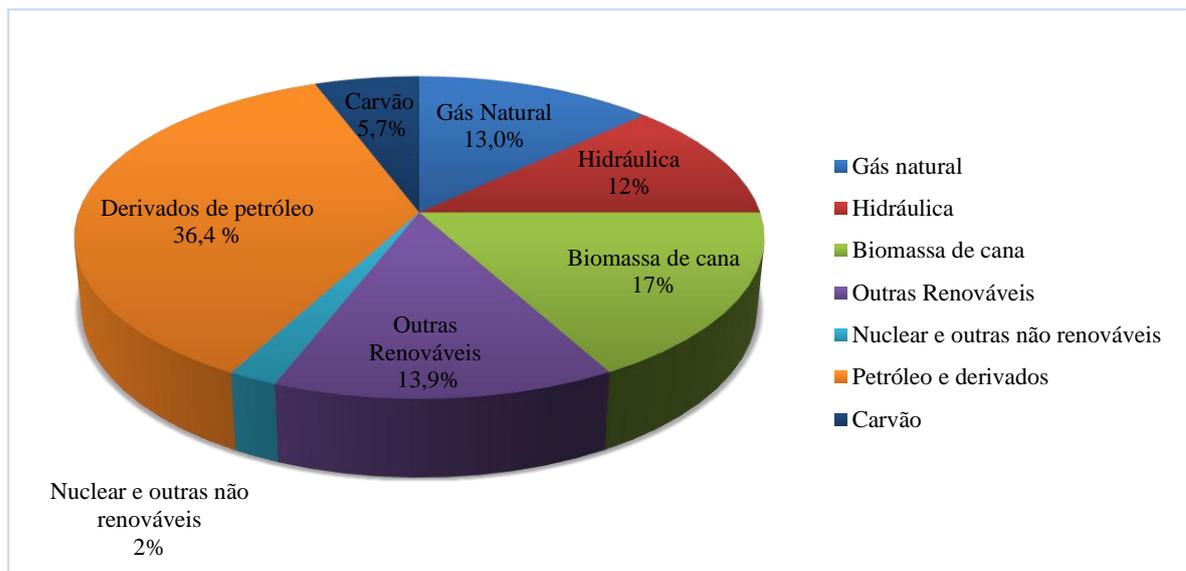


Figura 2- Participação do petróleo na oferta energética brasileira.  
Fonte: Elaboração própria com base em dados de 2017 do BEN/EPE/MME (EPE, 2018).

O petróleo é considerado uma matéria-prima essencial à vida moderna, sendo o componente básico para diversos produtos (BAHADORI, 2014). No entanto, é percorrido um longo caminho desde a prospecção até o consumo de derivados (Figura 3). No *downstream* encontra-se a etapa de refino, importante etapa da indústria de óleo e gás (MARIANO, 2005). No refino ocorrem transformações da matéria-prima fóssil, em sua maioria composta por hidrocarbonetos (ASTM, 2008), até a obtenção dos combustíveis, lubrificantes, produtos petroquímicos como as borrachas e plásticos e até mesmo a energia elétrica, ou seja, praticamente tudo é dependente de petróleo.

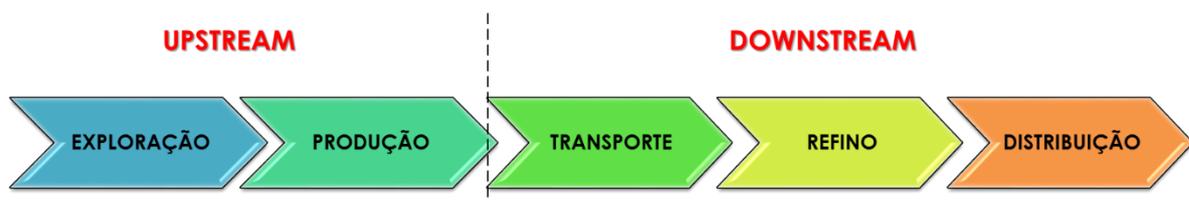


Figura 3- Etapas da cadeia produtiva do petróleo  
Fonte: elaboração própria

Para obtenção dos derivados e transformação do óleo cru em energia são necessários diversos processos industriais complexos e esta etapa é essencial na cadeia produtiva do petróleo, permitindo que a matéria com baixo valor comercial seja aproveitada ao máximo a partir de uma série de beneficiamentos (THOMAS, 2004). O Brasil foi o oitavo colocado no *ranking* mundial, em 2017, com capacidade de refino de 2,4 milhões de barris/dia (0,5% da capacidade mundial), somando as 12 refinarias PETROBRAS, as 4 da iniciativa privada – Riograndense, Manguinhos, Univen e Dax Oil – e a Fábrica de lubrificantes (LUBNOR) e a Fábrica de asfalto (FASF), conforme detalhado na Tabela 1.

Tabela 1- Capacidade de Refino no Brasil em 2017.

Refinaria	Município (UF)	Início de Operação	Capacidade nominal (Barril/dia)
Replan - Refinaria de Paulínia	Paulínia (SP)	1972	433.997
Rlam - Refinaria Landulpho Alves	São Francisco do Conde (BA)	1950	377.389
Revap - Refinaria Henrique Lage	São José dos Campos (SP)	1980	251.592
Reduc - Refinaria Duque de Caxias	Duque de Caxias (RJ)	1961	251.592
Repar - Refinaria Presidente Getúlio Vargas	Araucária (PR)	1977	213.853
Refap - Refinaria Alberto Pasqualini S.A	Canoas (RS)	1968	220.143
RPBC - Refinaria Presidente Bernardes	Cubatão (SP)	1955	169.825
Regap - Refinaria Gabriel Passo	Betim (MG)	1968	166.051
Recap - Refinaria de Capuava	Mauá (SP)	1954	62.898
Reman - Refinaria Isaac Sabbá	Manaus (AM)	1956	45.916
RPCC - Refinaria Potiguar Clara Camarão	Guamaré (RN)	2000	44.658
Rnest - Refinaria Abreu e Lima <sup>1</sup>	Ipojuca (PE)	2014	115.009
Refinaria de Petróleo Riograndense S.A	Rio Grande (RS)	1937	17.014
Refinaria de Petróleos de Manguinhos S.A.	Rio de Janeiro (RJ)	1954	14.000
Univen Refinaria de Petróleo Ltda	Itupeva (SP)	2007	5.158
Dax Oil Refino S.A	Camaçari (BA)	2008	2.095
Lubnor - Lubrificantes e Derivados de Petróleo do Nordeste	Fortaleza (CE)	1966	10.378
FASF - Refinaria Landulpho Alves Fábrica de Asfalto <sup>2</sup>	Madre de Deus (BA)	1950	3.774
Total (barril/dia)			2.405.342
Fator de utilização <sup>3</sup> (%)			76,2

<sup>1</sup>Autorizada a processar 100 mil barris/dia, conforme exigência da Renovação da Licença de Operação, emitida pela Agência Estadual de Meio Ambiente de Pernambuco. <sup>2</sup>Fabrica de asfalto da Refinaria Landulpho Alves (Rlam). <sup>3</sup>Fator de utilização das refinarias, considerando o petróleo processado no ano de 2017.

O problema é que apesar do refino ser estratégico para o setor petrolífero, sendo necessário para a transformação de todo este volume de óleo, as refinarias são grandes instalações industriais que, geralmente próximas a zonas urbanas, liberam emissões atmosféricas e produzem altos volumes de efluentes líquidos e resíduos sólidos de difícil tratamento e disposição. Além disto, as refinarias demandam grandes quantidades de água e consomem diversos produtos químicos, sendo consideradas as mais poluidoras de toda a cadeia petrolífera (MARIANO, 2005; LA ROVERE, 2016; RIZZO et al., 2006). Tudo isto contribui para que o setor seja visto, muitas vezes, como uma das atividades mais danosas ao meio ambiente no século XXI (DO BRASIL, 2011). O Banco Mundial e o *Industrial Pollution Projection System* (IPPS) classificaram o segmento como de alto potencial poluidor ao meio ambiente, com a liberação de diversos tipos de poluentes (SZKLO e MAGRINI, 2008).

## **2.2. Resíduos sólidos gerados nas refinarias**

Os resíduos sólidos das refinarias representam uma mistura de compostos orgânicos complexos, enxofre, nitrogênio, cálcio e metais. Os resíduos são em grande parte considerados resíduos industriais perigosos, segundo a NBR 10004 (ABNT, 2004). A quantidade dos resíduos é geralmente pequena comparada à quantidade de matéria processada, ficando na faixa de 1 a 2 kg por tonelada de petróleo refinado (DO BRASIL, 2011). No entanto, em números absolutos, somente o sistema PETROBRAS gerou e destinou, em 2017, 266 mil toneladas de resíduos, sendo 43% classificados como perigosos e provenientes das refinarias (ANP, 2018; PETROBRAS, 2018).

As borras oleosas compreendem os resíduos oleosos gerados, em maior quantidade nas refinarias, chegando a 3% da carga de petróleo processada (HEIDARZADEH; GITIPOUR; ABDOLI, 2010; LADISLAO, 2008; NUNES, 2018; PETROBRAS, 2018; SILVA 2013). Tanto o tratamento como o gerenciamento de borras oleosas são essenciais para promover uma gestão sustentável de exploração e aproveitamento dos recursos naturais. Esse gerenciamento inclui as alternativas de redução, reutilização e reciclagem, por meio de processos físicos, químicos e biológicos que podem ser usados em série e/ou em paralelo para reduzir a contaminação ambiental aos níveis aceitáveis pelos órgãos ambientais. As borras são a maioria dos resíduos perigosos gerados no sistema PETROBRAS e 47% delas são encaminhadas para recuperação, reciclagem e reuso (PETROBRAS, 2018).

Outro resíduo também significativo é o lodo biológico gerado no tratamento dos efluentes das refinarias de petróleo, podendo atingir volumes equivalentes a cerca de 1% dos efluentes tratados (MARIANO, 2005). Para este resíduo, são encontrados bem menos estudos em termos de alternativas mais sustentáveis. Estes resíduos, de característica majoritariamente não perigosa, passam por etapas de redução de volume e desidratação para depois serem dispostos em aterros ou são incinerados e os rejeitos finais também colocados em aterros (FOLADORI; ANDREOTTOLA; ZIGLIO, 2010; JERÔNIMO e KITZINGER, 2014; MARIANO, 2005; DO BRASIL, 2011). Atualmente, 37% dos resíduos não perigosos são encaminhados para disposição em aterros (PETROBRAS, 2018). A maioria dos estudos relacionados aos lodos de Estações de Tratamento de Efluentes (ETE) são os que objetivam o tratamento e disposição de lodos gerados em plantas de tratamento de esgoto.

Cada vez mais é necessária a manutenção do meio ambiente ecologicamente equilibrado e entender os males acerca da saúde humana, conforme preleciona a Constituição. De maneira que esforços devem ser empreendidos para o correto tratamento destes resíduos com o menor custo possível, isto é, visando à sustentabilidade (NUNES, 2018). Além disto, a não observância de atividades insustentáveis pode influenciar clientes e consumidores finais. Por isso, também é crescente nas empresas um movimento para abatimento da poluição, incentivos e atendimento à legislação ambiental cada vez mais restrita.

### **2.3. Origem, tratamento e disposição do lodo do tratamento de efluentes de refinarias**

Com a elevada carga refinada e, conseqüentemente, os volumes de efluentes a serem tratados, é gerada uma quantidade significativa de resíduos sólidos oriundos do tratamento de efluentes, o chamado lodo secundário de refinaria.

Os efluentes são os maiores subprodutos durante as operações industriais e podem ser definidos como uma mistura complexa de componentes orgânicos e inorgânicos em fase aquosa e com caráter poluidor. Os tratamentos objetivam alterar a composição química e física de tais correntes líquidas de modo a permitir seu descarte de acordo com as normas da legislação ou ainda permitir o reuso (DO BRASIL, 2011).

Considerando apenas os dados disponíveis da PETROBRAS, 98,6% do refino no Brasil (ANP, 2018), em 2017 o volume de efluentes descartados nos corpos receptores foi de 297,12

milhões de metros cúbicos (PETROBRAS, 2018). Como estima-se que o volume de efluentes gerados seja mais de 3 vezes o volume de petróleo refinado, mais de 474 L de efluentes foram gerados por barril de petróleo processado (Tabela 2).

Tabela 2- Geração de efluentes e volume refinado

Volumes/quantidades	Unidade	Valor
Descarte de efluentes <sup>a</sup>	milhões de m <sup>3</sup>	297,12
Carga processada <sup>b</sup>	mil barris/d	1.717,47
Geração de efluentes	m <sup>3</sup> /barril refinado	0,474
Razão geração de efluentes/barril refinado		2,98

<sup>a</sup>considerados efluentes sanitários e água produzida; <sup>b</sup>barril de petróleo = 159L.

Fonte: Petrobras (2018)

O sistema de tratamento de efluentes geralmente é composto por uma etapa primária, na qual são retidos sólidos grosseiros e óleo livre, uma etapa secundária na qual é removida a matéria orgânica e óleos emulsionados e a maior parte do caráter poluidor e, opcionalmente, um tratamento terciário, para o polimento do efluente tratado e seu uso em funções mais nobres que o encaminhamento para descarte (METCALF e EDDY, 2014). Neste trabalho, somente o lodo do tratamento secundário foi considerado.

A principal forma de tratamento secundário de efluentes de refinaria de petróleo é o sistema de lodos ativados, por ser um processo de operação versátil, proporcionar um efluente final de alta qualidade e não necessitar de grandes áreas para sua instalação quando comparado com outros processos biológicos (VON SPERLING, 2002).

O processo de lodos ativados consiste basicamente de um tanque aerado, contendo biomassa microbiana que degrada a matéria orgânica do efluente, seguido de um tanque de decantação onde ocorre um adensamento do lodo, e um sistema de recirculação e descarte, onde parte do lodo gerado é reenviado ao tanque aerado e parte é descartada (METCALF e EDDY, 2014). O lodo biológico excedente a ser descartado é a grande desvantagem do processo (Figura 4), pois até 40% da matéria orgânica alimentada ao tanque aerado pode ser convertida em biomassa (excesso de lodo). O gerenciamento deste excesso de lodo biológico apresenta alto custo, podendo chegar até 60% do custo total de uma planta de tratamento, sendo este usualmente disposto em aterros industriais (FOLADORI; ANDREOTTOLA; ZIGLIO, 2010).

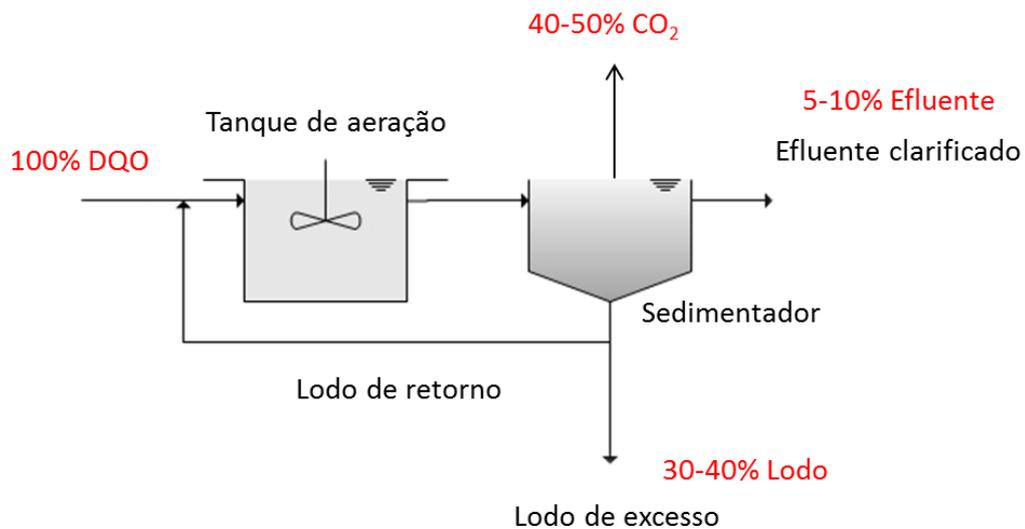


Figura 4- Sistema simplificado do processo de lodos ativados.  
 Fonte: adaptado de VON SPERLING (2002) e BAHADORI (2014).

O lodo secundário oriundo de refinarias de petróleo é um resíduo sólido de constituição essencialmente orgânica, podendo conter elementos minerais, metais pesados e outros compostos tóxicos, e ainda agentes patogênicos (mais em lodos sanitários que industriais) que necessita de gerenciamento. O excesso de lodo se encontra parcialmente estabilizado, com alta umidade e é comumente encaminhado aos aterros industriais após completa estabilização. Pode ser considerado tanto um produto perigoso, em função de seus potenciais impactos negativos quando disposto de forma inadequada, quanto um recurso de potencial energético, fertilizante ou estrutural que pode ser reaproveitado (BRASIL, 2010; ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014). Usualmente, seu gerenciamento nas refinarias consiste basicamente em redução de volume por retirada de água seguido de estabilização para redução do teor de matéria orgânica, não havendo aproveitamento deste resíduo (BAHADOTI, 2014; ALEXANDRE, 2013).

Os aterros, apesar de serem considerados uma técnica adequada de disposição final, evitar riscos à saúde, apresentar baixo impacto ambiental e custos menores que outras alternativas usuais de disposição, têm sérias desvantagens. Estes utilizam grandes áreas e há forte oposição pública à abertura de novos aterros, liberam odores e, se não forem bem operados, atraem vetores e animais. Lixiviados e percolados comprometem os recursos hídricos subterrâneos e superficiais e ainda colaboram para diminuição da vida útil do aterro, geram um passivo ambiental que precisa ser monitorado após sua inativação, principalmente devido à produção de gases que devem ser queimados em *flares*, e não há qualquer preocupação em se recuperar nutrientes ou se utilizar o resíduo estabilizado para qualquer finalidade útil, além de não

permitir a economia de recursos naturais. E ainda, os aterros com recuperação energética necessitam de sistema de drenagem e remoção de percolados, sistemas de tratamento de efluentes, monitoramento das águas subterrâneas, sistema de tratamento de gases e impermeabilização das camadas do solo que, apesar dos benefícios ambientais, acrescentam custos acentuados tornando muitas vezes o balanço sustentável negativo (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; MONTEBELO, 2016).

Outra forma muito utilizada é o tratamento térmico por incineração, ou seja, a queima do resíduo a altas temperaturas. É um processo de estabilização do lodo que propicia maior redução do volume encaminhado para disposição. A incineração é um processo destrutivo, pois elimina praticamente todos os componentes, restando somente as cinzas (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014). No entanto, podem ser formados subprodutos mais tóxicos que os originais (ALVES e BRITO, 1995) e gases com alto caráter poluidor. Devido ao grau de sofisticação e ao alto custo de implementação e operação, atualmente o uso de incineradores para tratar lodos fica restrito a grandes volumes de tratamento, usualmente sendo empregados para lodos sanitários em áreas de alta densidade populacional. E mesmo considerando o aproveitamento do calor gerado, esta tecnologia não pode ser classificada como uma forma de valorização do resíduo, já que seu balanço energético é negativo, devido ao alto teor de água no lodo (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014). Sendo apresentadas como principais desvantagens o alto custo e a emissão de gases poluentes e material particulado. Além da geração de cinzas que também deverão ser dispostas adequadamente, havendo divergências trata-se de um método de tratamento ou de disposição. Dependendo das características do lodo, de 10 a 30% dos sólidos secos encaminhados para incineração permanecem como cinzas (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014).

A reciclagem para a agricultura seria o melhor método de disposição a ser empregado, muito usado para lodos convencionais de sistemas de tratamento de esgoto sanitário. No entanto, no caso dos rejeitos de refinaria, que possuem mais componentes tóxicos que os convencionais, tal característica dificulta ou impossibilita esta alternativa. Antigamente ocorria a disposição final em oceanos, mas, em muitos países, entre eles EUA e Brasil, esta prática é proibida (MARIANO, 2005; TELLES e COSTA, 2010; BAHADORI, 2014).

A avaliação de alternativas para o tratamento e disposição final dos lodos normalmente é difícil por envolver aspectos técnicos, econômicos, ambientais e legais. Como o caminho que leva à disposição final dos lodos é caro e complexo, chegando até 60% do custo total de

operação da planta de tratamento (pois envolve tratamento, transporte, disposição e monitoramento futuro), muitas vezes o gerenciamento destes lodos é negligenciado. Quando deveria ser parte integrante do projeto da estação, considerando a qualidade requerida do efluente tratado, o tipo de tratamento visando reaproveitamento, a valoração do resíduo e a disposição final mínima possível (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014).

#### **2.4. Gerenciamento de resíduos sólidos e suas perspectivas**

Em 2010, o Congresso Nacional do Brasil aprovou a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), Lei Federal nº 12.305 (BRASIL, 2010). Este foi um importante passo para uma maior atenção à problemática dos resíduos sólidos no Brasil. Governos, instituições públicas, o setor privado e os consumidores passaram a partilhar a responsabilidade, que a princípio era somente do gerador. Na prática, todos os atores participantes do gerenciamento são responsáveis pelos resíduos. Nos casos em que o gerador subcontrata o gerenciamento, este também é responsável pelo resíduo gerado. Isto amplia as preocupações das grandes corporações para o tratamento mais adequado, obrigando todos os níveis a desenvolver e articular mecanismos adequados de gestão, tratamento e disposição final dos resíduos. Além disto, a PNRS dispõe sanções como poluidor-pagador, reparação de danos e amplia o crime ambiental (BRASIL, 2010; MONTEBELO, 2016; OCHARÁN, 2017).

Mesmo fora do cenário corporativo, o cidadão é responsável não só pela disposição correta dos resíduos que gera, mas também é importante que repense e reveja o seu papel como consumidor. O setor privado, por sua vez, fica responsável pelo gerenciamento ambientalmente correto dos resíduos sólidos, pela sua reincorporação na cadeia produtiva e pelas inovações nos produtos que tragam benefícios socioambientais, sempre que possível. Já os governos federal, estaduais e municipais são responsáveis pela elaboração e implementação dos planos de gestão de resíduos sólidos, assim como dos demais instrumentos previstos na PNRS (BRASIL, 2010).

Faz parte do gerenciamento dos resíduos sólidos, as etapas que compreendem a coleta, classificação, segregação, armazenagem, transporte, tratamento e disposição final e ainda os aspectos de treinamento de pessoal, manuseio e procedimento de emergência, dentro de critérios de garantia da proteção ambiental, saúde e bem-estar público (ABNT, 2004). Na PNRS, foi adicionada a premissa de que os resíduos devem seguir o gerenciamento até o tratamento e somente os rejeitos devem ser dispostos de forma ambientalmente adequada e

devem-se ter planos prévios de gestão integrada dos resíduos sólidos (BRASIL, 2010; MONTEBELO, 2016).

Mais avançados que o Brasil, muitos países já adotaram instrumentos legais e econômicos de restrições ao uso de aterros, o que influencia profundamente as decisões de gerenciamento e disposição, uma vez que os aterros até então são a forma mais comum de disposição de resíduos no mundo. Isto se deve ao reconhecimento de que a disposição em aterros não é uma prática sustentável e que ao longo dos anos espera-se perder força na sua maior vantagem, o custo, em função das maiores distâncias entre os centros urbanos e os aterros e às crescentes restrições ambientais. A tendência mundial fica a cargo de investimentos no aumento da eficácia e economia de energia em processos de incineração e recuperação da energia dos resíduos em processos como o de digestão anaeróbia, que podem ser colocados na mesma estação de tratamento em que o resíduo foi gerado, reduzindo gastos com o transporte e impactos com o tráfego gerado em áreas urbanas (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014).

A busca por soluções na área de resíduos reflete a demanda da sociedade que pressiona por mudanças motivadas pelos elevados custos socioeconômicos e ambientais. Porém, os impactos do gerenciamento podem ser positivos ou negativos. Se manejados adequadamente, os resíduos sólidos adquirem valor comercial e podem ser utilizados em forma de novas matérias-primas ou novos insumos. Isto é, através de planejamento e melhor forma de gerenciamento podem trazer benefícios diretos e indiretos, tais como benefícios ambientais como a redução da quantidade de resíduos, do uso de recursos naturais e de outros impactos ambientais provocados pela disposição inadequada dos resíduos; benefícios gerenciais como a redução de custos, proporcionar a abertura de novos mercados, geração de empregos, geração de receita, melhoria de imagem (*marketing* verde) e conduzir à inclusão social (BRASIL, 2010; MONTEBELO, 2016).

Neste contexto que objetiva novas rotas para o melhor gerenciamento e sustentabilidade tem-se a digestão anaeróbia que, apesar de não ser um método de disposição final, pode ser uma alternativa à rota que leva os lodos de refinaria direto aos aterros ou incineradores. Desta forma, é feita a passagem do resíduo pelo sistema de tratamento biológico anaeróbio, reduzindo os volumes a serem dispostos e a quantidade de matéria orgânica, reaproveitando energeticamente os resíduos na forma de subprodutos de valor agregado e trazendo ganhos ambientais para então encaminhar os rejeitos aos aterros. Esta opção corrobora com a

recomendação do gerenciamento dos resíduos da PNRS segundo a qual é preferível reaproveitar e tratar, e somente dispor quando já esgotadas as demais alternativas (Figura 5).

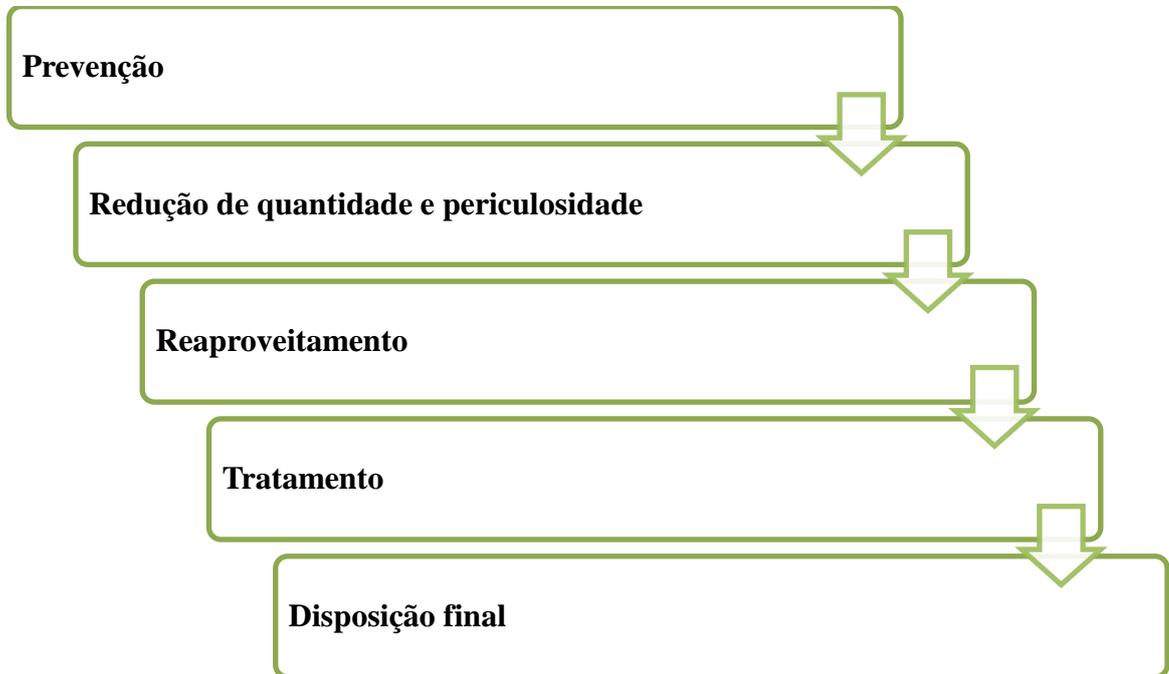


Figura 5- Ordem preferencial do gerenciamento dos resíduos sólidos  
Fonte: Brasil (2010)

## 2.5. O processo de digestão anaeróbia

A digestão anaeróbia é um processo através do qual resíduos orgânicos são biologicamente convertidos por um consórcio microbiano, na ausência de oxigênio (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; CHERNICHARO, 2007). Além de estabilizar a carga orgânica poluente dos resíduos, tem-se a redução de microrganismos patogênicos, a geração de produtos como o biogás composto por cerca de 60% de metano e 40% de dióxido de carbono (MOLINO, 2013), e um resíduo orgânico rico em nutrientes assimiláveis que, dependendo da qualidade, pode ser usado diretamente como biofertilizante (KUNZ; PERDOMO; OLIVEIRA, 2004; LANSING; BOTERO; MARTIN, 2008; SILVEIRA, 2016).

A digestão anaeróbia é historicamente utilizada para a estabilização de lodo gerado no tratamento de esgotos, porém uma aplicação também viável para o tratamento de qualquer matéria orgânica. Há muitos anos vem sendo amplamente utilizada no tratamento de resíduos sólidos, incluindo resíduos provenientes de culturas agrícolas, dejetos de animais, e outros resíduos sólidos orgânicos (CECCHI, 1991; SILVA, 2009).

Dentre suas vantagens, destacam-se o baixo requerimento energético para a operação, a não necessidade de aeração, menor área para implantação, altas remoções de matéria orgânica e recuperação de biogás (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; CHERNICHARO, 2007). Assim, conforme relataram Brunhara e seus colaboradores (2015), a utilização da digestão anaeróbia no tratamento de resíduos sólidos orgânicos e na produção de energia é não só desejável, mas torna-se cada vez mais imprescindível, uma vez que os custos pertinentes a esta tecnologia produzem boas respostas para o tratamento de resíduos orgânicos que se colocam de forma quase dramática nas sociedades industrializadas.

O teste do Potencial Bioquímico de Metano (BMP - da sigla em inglês) é uma medida da biodegradabilidade do substrato (resíduo), determinada pelo monitoramento da produção cumulativa de metano a partir de uma amostra incubada sob anaerobiose. Este teste pode ser o ponto de partida para a determinação das condições utilizadas para os experimentos da digestão anaeróbia. Para a realização do teste BMP, amostras do resíduo sólido são incubadas com meio de cultura e, se necessário, inóculo (CHYNOWETH et al., 1993; OWEN et al., 1979). Este teste necessita de condições bem controladas para que a digestão anaeróbia aconteça da melhor maneira possível, podendo assim ser obtido o potencial máximo de produção de metano a partir do resíduo estudado. É importante saber quais são as condições que o teste deve ser submetido, observando vários fatores que podem influenciar o resultado da produção de metano esperada.

Não há um consenso para a determinação do BMP. Algumas condições são similares, e por vezes até coincidentes, nos métodos propostos por alguns autores. No entanto, não há um consenso geral sobre todos os parâmetros envolvidos no método, ou seja, não há um método padrão, conforme apresentado na Tabela 3. Algumas condições podem ser estabelecidas como as mais comuns dentre os trabalhos analisados, tais como: temperatura de 35°C, tempo de 30 dias ou até estabilização, pH maior que 7, utilização de controle somente com inóculo e I/S (razão inóculo por substrato) de até 2.

Além destes parâmetros, Holliger et al. (2016) e Raposo et al. (2011), trabalhos mais recentes aqui analisados com o viés de avaliação dos métodos de BMP, recomendam ainda observar os valores de alcalinidade - que deve estar na faixa de 2500-5000 mg CaCO<sub>3</sub>/L, faixa de Sólidos Voláteis de 20 a 60 g/L; ácidos graxos voláteis menor que 1,0 g Ácido acético/L; e NH<sub>4</sub><sup>+</sup> menor que 2,5 g/L.

Tabela 3- Resumo de condições recomendadas para avaliação do Potencial Bioquímico de Metano por diferentes autores.

Referência	T (°C)	Tempo (d)	pH	Volume (mL)	Experimento de Controle	Agitação (rpm)	I/S (em SV)
PAUL e LIU (2012)	35	30	-	-	Somente inóculo	-	2
CHYNOWETH et al. (1993)	35	46	-	100	Inóculo (1 <sup>ário</sup> )	-	2
OWEN et al. (1979)	35	30 e 45	7,1	250/ 160 <sup>a</sup>	Inóculo + meio	-	20% Inóculo
RAPOSO et al. (2011)	35-41	13-87	7-7,8	100 ou 500	Somente inóculo/ Controles positivos	Manual 1x dia ou sem agitação	≥2
HOLLIGER et al. (2016)	37	3 <sup>b</sup>	7-8,5	100 a 500	Somente inóculo/ Controles positivos	Manual 1x dia ou sem agitação	2 a 4 <sup>c</sup>
BADSHAH; LIU; MATHIASSEN (2012)	37	10 <sup>d</sup> + 33	7,2-8,1	460	Somente inóculo	46 <sup>e</sup>	2
BADSHAH et al. (2012)	37	10 <sup>d</sup> + 33	7,2-8,1	460	Somente inóculo	46 <sup>e</sup>	3 a 8

<sup>a</sup> volume útil; <sup>b</sup> 3 dias consecutivos com até 1% de diferença máxima; <sup>c</sup> testar 3 condições de I/S preferencialmente, ou 2 se apresentarem resultado igual; <sup>d</sup> pré-incubação; <sup>e</sup> automática intermitente (30 segundos ligada e 120 segundos desligada).

## 2.6. O processo de codigestão anaeróbia

A digestão de matérias-primas recalcitrantes ou com compostos inibitórios e substratos altamente ricos em proteínas pode ser um processo lento e com baixa produção de biogás (PATINVOH et al., 2016). Uma alternativa para superar estas restrições e melhorar o desempenho do processo de digestão anaeróbia é utilizar a codigestão anaeróbia, que pode propiciar o equilíbrio de nutrientes e aumentar a quantidade de substratos com maior potencial de biodegradabilidade, além de incorporar biomassa mais adaptada à bioestabilização dos resíduos (JINGURA e MANTENGAIFA, 2009; LOPES; LEITE; PRASAD, 2004).

A codigestão anaeróbia é um processo de tratamento de resíduos, similar à digestão anaeróbia, no qual diferentes tipos de resíduos passíveis de fermentação são misturados e tratados conjuntamente em proporção adequada, considerando a relação C/N, inibidores, nível de biodegradabilidade da matéria-prima e conteúdo sólido total. Ou seja, é uma estratégia eficiente para reduzir a inibição de amônia durante o processo de digestão, uma vez que visa favorecer sinergismos, diluindo compostos prejudiciais e aperfeiçoando de fato todo o processo, além de gerar uma partilha de custos, tratando diferentes resíduos em instalação única (AGDAG e SPONZA, 2007; ALATRISTE-MONDRAGON et al., 2006; MATA-ALVAREZ et al., 2014). Considerando o fato de que as matérias-primas degradadas não estão altamente disponíveis e os problemas associados aos pré-tratamentos, a codigestão é uma boa estratégia para aumentar a quantidade de biogás produzido, evitando os custos e os desafios associados aos pré-tratamentos (PATINVOH et al., 2016).

Estudos sobre tipos de resíduos para a codigestão são os mais variados, tais como: lodo industrial que foi cobioestabilizado com os resíduos sólidos urbanos (AGDAG e SPONZA, 2007; SOSNOWSKI; WIECZOREK; LEDAKOWICZ, et al. 2003) que proporcionou aumento na quantidade de metano em comparação com resíduos sólidos urbanos bioestabilizados isoladamente; Codigestão anaeróbia de resíduos vegetais mais lodo anaeróbio de esgoto sanitário (KIM et al, 2003; LEITE et. al, 2017; LEITE et al., 2014); codigestão de silagem de colheita com estrume de vaca (COMINO; ROSSO; RIGGIO, 2010); misturas de estrume, resíduos de matadouros, resíduos sólidos municipais e resíduos de culturas (PAGÉS-DÍAZ et al. 2011); Resíduos de tubos de papel com lodo industrial (TEGHAMMAR, et al., 2013). É possível observar que em alguns casos o resíduo também pode assumir a função de inóculo.

Nestes estudos, sob uma variedade de cenários, os autores obtiveram aumentos de 15 até 109% da produção de biogás a partir da mistura de resíduos, quando comparada com a obtida com os resíduos isolados.

No entanto, ainda são necessárias mais pesquisas nesta área para uma melhor compreensão das proporções de mistura adequadas, dentre outros efeitos (PATINVOH et al., 2016). Por exemplo, um benefício da codigestão é a redução do acúmulo de amônia quando as matérias-primas com alto teor de proteína são digeridas. Chernicharo (2007) estabelece uma relação C/N ótima para a digestão anaeróbia de 20 a 30, e estes valores são tomados como referência em trabalhos de todo o mundo. No entanto, Zeshan; Karthikeyan; Visvanathan (2012) relataram que o ajuste da relação C/N para 32 resultou em 30% menos formação de amônia na codigestão seca de restos de alimentos, resíduos de frutas e vegetais, resíduos de jardim e papel.

Neste trabalho, a busca por um resíduo que fosse adequado à codigestão anaeróbia levou ao resíduo oriundo do preparo de alimentos, visto que o resíduo principal (lodo de refinaria) apresenta baixa relação C/N. O uso de um cossubstrato (restos de alimentos) com baixo teor nitrogênio e lipídios pode auxiliar no ajuste da razão C/N ótima, visto que aumentará o carbono presente na mistura e conseqüentemente a razão C/N. Desta forma, pode-se minimizar a inibição por altas concentrações de amônia e o conseqüente acúmulo de ácidos graxos voláteis (AGV), aumentando a produção de biogás (SEN et al., 2016).

Os alimentos que não são consumidos ou os restos do preparo, ambos descartados no lixo, podem ser utilizados como alimentos para animais, na compostagem, na produção de energia ou, o que deve ser evitado, encaminhados aos aterros. Estima-se que cerca de um terço dos alimentos produzidos na Europa não sejam consumidos. A Comissão Europeia estima que, só na União Europeia, se desperdicem 90 milhões de toneladas de alimentos por ano (ou seja, 180 kg por pessoa). O desperdício de alimento está diretamente ligado ao desperdício do uso da terra, água, energia e de todos os outros fatores utilizados no seu ciclo de produção. Por conseqüente, qualquer diminuição do desperdício de alimentos implica potenciais ganhos para o meio ambiente. Se a quantidade de alimentos desperdiçados é reduzida ao longo do sistema alimentar, serão necessários menos água, menos adubos, menos terras, menos transportes, menos energia, menos recolhimento de resíduos e outros (AEA, 2017).

A pegada global de carbono associada ao desperdício de alimentos, em 2007, foi estimada em 3,3 bilhões de toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente. Pode-se afirmar que o desperdício de alimentos

é o terceiro maior emissor de gases de efeito estufa, considerando o *ranking* nacional de emissões, sendo precedido apenas pelas emissões totais geradas nos Estados Unidos e China (FAO, 2013).

Tais resíduos, quando em ambientes naturais equilibrados, são espontaneamente degradados, reciclando os nutrientes nos ciclos biogeoquímicos. Quando em grande volume e dispostos de maneira inadequada, podem representar sério risco ambiental devido à geração de lixiviado, emissão de gases na atmosfera, além do favorecimento da proliferação de vetores de doenças. Por isto, o emprego de métodos adequados de gestão e tratamento destes resíduos é imprescindível para a correta estabilização da matéria orgânica putrescível. E alerta-se para a necessidade de investimento em pesquisa e implantação efetiva de tecnologias na área de tratamento de resíduos no Brasil e no mundo (BRASIL, 2010; BRUNHARA et al., 2015).

Seguindo a hierarquia já mencionada sobre ordem ambientalmente correta de gerenciamento de resíduos sólidos, a reciclagem dos alimentos desperdiçados é considerada atrativa, pois resulta na produção de biogás para aproveitamento energético. Ou seja, tem-se a metanização dos resíduos alimentares através da digestão anaeróbia, que é uma alternativa viável para o tratamento e valoração dos resíduos alimentares (LI; PARK; ZHU, 2011; BROWNE e MURPHY, 2013; FERREIRA, 2015). Em muitos países desenvolvidos, estes processos e também a compostagem são amplamente utilizados para o tratamento das frações orgânicas putrescíveis dos resíduos sólidos municipais (GÓMEZ, 2006).

O trabalho de Lin et al (2011) relata diferenças entre a digestão anaeróbia de resíduos de alimentos convencionais na China e de somente resíduos de frutas e vegetais. Nesta comparação, observou-se que o reator alimentado apenas com resíduos de frutas e vegetais acumulou bem menos ácidos graxos e permaneceu estável; já no reator alimentado com restos de comida, foram verificados valores elevados de amônia e ácidos. No Brasil, o trabalho de Silveira (2016) também avaliou os restos de comida de um restaurante universitário e o mesmo comportamento de acúmulo de amônia e ácidos foi percebido. Portanto, a escolha do tipo de resíduo alimentar também pode influenciar na avaliação de quão vantajosa pode ser a codigestão com estes resíduos. Nesta revisão não foram encontrados trabalhos utilizando a codigestão do resíduo alimentar com os lodos de refinaria de petróleo.

## 2.7. Matriz SWOT e sua aplicação a resíduos

Alguns estudos apontam, desde o início do século XXI, que o desenvolvimento sustentável será a única alternativa para o planeta, que já não suporta o consumo da sociedade. E, ainda, que é necessário manter noções de sustentabilidade da produção ao consumo (UNEP, 2002).

O relatório de Brundtland, publicado pela WCED (1987), definiu pela primeira vez o que seria conhecido como desenvolvimento sustentável. Isto é, o desenvolvimento que atende as necessidades do presente sem comprometer as gerações futuras de atender suas necessidades. Ao conceito de sustentabilidade foi acrescentado o fator social, formando o famoso tripé da sustentabilidade (Figura 6) que atualmente é seguido em todo o mundo, levando em consideração o lucro, mas também o meio ambiente e as pessoas.

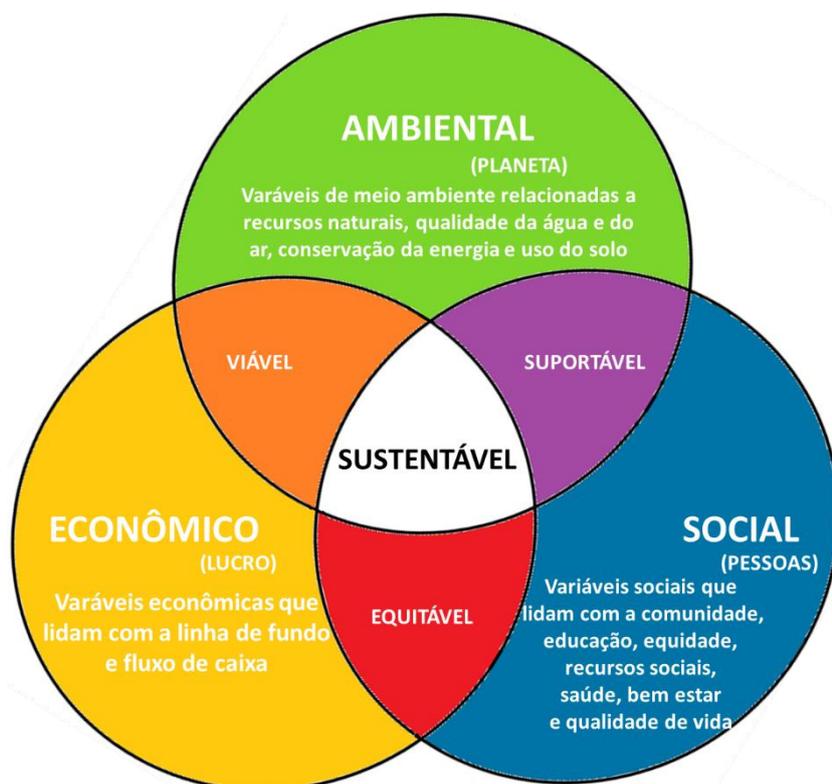


Figura 6- Detalhamento sobre os constituintes da sustentabilidade.  
Fonte: Giovanelli (2015)

O conceito de sustentabilidade migrou também para as empresas. É sabido que corporações que tomam medidas proativas considerando o desenvolvimento sustentável apresentam melhores resultados do que empresas reativas (SZKLO e MAGRINI, 2008). A promoção da

sustentabilidade é algo debatido de forma estratégica em vários níveis e suas diversas ferramentas são, em muitos casos, meios utilizados para a tomada de decisões.

Medir a sustentabilidade não é uma tarefa fácil e existem diversas métricas adotadas mundialmente (SLAPER e HALL, 2011). Atualmente, vários critérios são utilizados por diferentes autores para tentar definir o que compõe a sustentabilidade. Dentre os disponíveis na literatura, tem-se os princípios fundamentais da sustentabilidade, da engenharia e da química verde e outros critérios e princípios definidos nas conferências internacionais de meio ambiente que visam uniformizar e atingir a sustentabilidade nas empresas, indústrias e processos garantindo melhorias para as gerações futuras (ABRAHAM e NGUYEN, 2003; ANASTAS e WARNER, 1998; ANASTAS e ZIMMERMAN, 2003; BEN- ELI, 2005).

Buscando uma ferramenta da gestão e administração, verificou-se que a Matriz SWOT pode ser utilizada para avaliação de tecnologias com inspiração no tripé da sustentabilidade, avaliando os fatores mais importantes contidos nesta matriz através de aspectos ambientais, econômicos e sociais.

A Matriz SWOT, como ferramenta estratégica com foco em entender as variáveis que compõem a sustentabilidade da empresa ou processo, já foi utilizada por diversos autores nos mais variados segmentos. No estudo de Loch, Nardi e Rojo (2016), a análise SWOT foi realizada para avaliar estrategicamente a gestão ambiental aplicada em empresas do setor de agronegócio no que se refere à promoção da sustentabilidade desenvolvida pelas mesmas. Já Marchezi (2013) teve como objetivo avaliar as tecnologias adotadas pelo setor de papel e celulose no Brasil, de modo a identificar as que contribuem para a melhoria da sustentabilidade do setor.

Segundo Fernandes (2012), a Matriz SWOT foi estruturada entre as décadas de 1950 e 1960, e continua contribuindo para a sua disseminação no planejamento estratégico, principalmente de empresas. Este instrumento é relevante no que diz respeito a ajudar na construção da estratégia, enfatizando a necessidade de se realizar o diagnóstico dos ambientes interno e externo para a construção de um caminho orientado pelo pensamento estratégico e convergente com as necessidades futuras.

A matriz se popularizou por sua forma simples de dispor os fatores, pela capacidade de demonstrar a posição da organização frente ao cenário escolhido e de permitir maior facilidade

na análise do diagnóstico empresarial para decisões que podem ser tomadas em curto, médio e longo prazo, ganhando, assim, aplicação em escala global. Hoje também é bastante utilizada em conjunto com outras ferramentas e técnicas para elaboração do planejamento estratégico das organizações (FERNANDES, 2012). Esta análise também é útil para revelar pontos fortes que ainda não foram plenamente utilizados e identificar pontos fracos que podem ser corrigidos (WRIGHT; KROLL; PARNELL, 2009).

A matriz SWOT é definida como uma ferramenta de análise estratégica que elenca forças, oportunidades, ameaças e fraquezas, considerando fatores internos e externos. Como visto na Figura 7, os fatores internos são representados pelas forças (*S- strengths*) e fraquezas (*W- weaknesses*), enquanto os fatores externos são representados pelas oportunidades (*O- opportunities*) e as ameaças (*T- threats*) (MINDTOOLS, 2011; PESSÔA, 2007).



Figura 7- Exemplo de Matriz SWOT.  
Fonte: Adaptado de Fernandes, 2012.

Entende-se por ambiente externo fatores demográficos, econômicos, político-legais, socioculturais, tecnológicos, globais e físico-ambientais. Em um ambiente industrial, os fatores externos também são aqueles referentes aos concorrentes que fabricam os mesmos produtos e/ou oferecem os mesmos serviços, fatores que não dependem em si da organização em questão. As companhias não podem controlar diretamente esses segmentos, embora, sim poderão

reconhecer cada cenário e prognosticar o efeito que cada tendência produzirá nela (JHONSON; SCHOLE; WHITTINGTON, 2006; HITT; IRELAND; HOSKISSON, 2015).

May (2010) destaca que a biodiversidade, os ecossistemas e os recursos naturais, hoje em dia, são dimensões do ambiente externo a serem consideradas na tomada de decisões por várias organizações e companhias a fim de observar e controlar seu impacto ambiental donde elas operam e melhorar sua eficiência produtiva.

Já o ambiente interno refere-se à disponibilidade e deslocamento de recursos humanos, disponibilidade dos recursos financeiros, políticas internas, características únicas da organização, eficiência produtiva, qualidade, inovação, abastecimento, distribuição, habilidades e expertises do pessoal (FERREL e HARTLINES, 2012; HITT; IRELAND; HOSKISSON, 2015).

No tocante a aplicação da análise SWOT, segundo Híjar (2014) e Ferrell e Hartlines (2012), deve-se ter cuidado para não haver confusão na identificação e separação dos temas internos dos externos. Por exemplo, ameaças com fraquezas, visto que as primeiras não estão sob o controle da empresa, mas estão no seu entorno imediato, e as segundas são inerentes à empresa, suas ausências ou deficiências. O mesmo cuidado deve ser tomado com as oportunidades e fortalezas, visto que as primeiras são geradas nos mercados ou ambientes e as segundas são possuídas pela empresa.

Certamente uma das limitações desta análise é a subjetividade e ambiguidade na percepção de quem está realizando-a. Deve-se evitar os pré-conceitos e brechas que lhe imprimem certos pareceres de caráter sentimental e/ou pessoal na determinação de fatores, posto que podem induzir um mal diagnóstico e interpretação (HÍJAR, 2014).

A matriz pode e, em muitos casos, deve ser combinada com outras ferramentas para melhor entendimento ou aprofundamento do cenário. Uma análise complementar da matriz SWOT é a realização de arranjos entre os elementos da matriz, utilizando dois conjuntos entre fatores de ambientes interno e externo. Estes quadrantes foram definidos pensando no ambiente organizacional, onde os cruzamentos dos fatores internos com os externos determinam os diferentes quadrantes de I a IV (Figura 8) que têm significados distintos e importantes (FERNANDES, 2012; RODRIGUES et al., 2016).

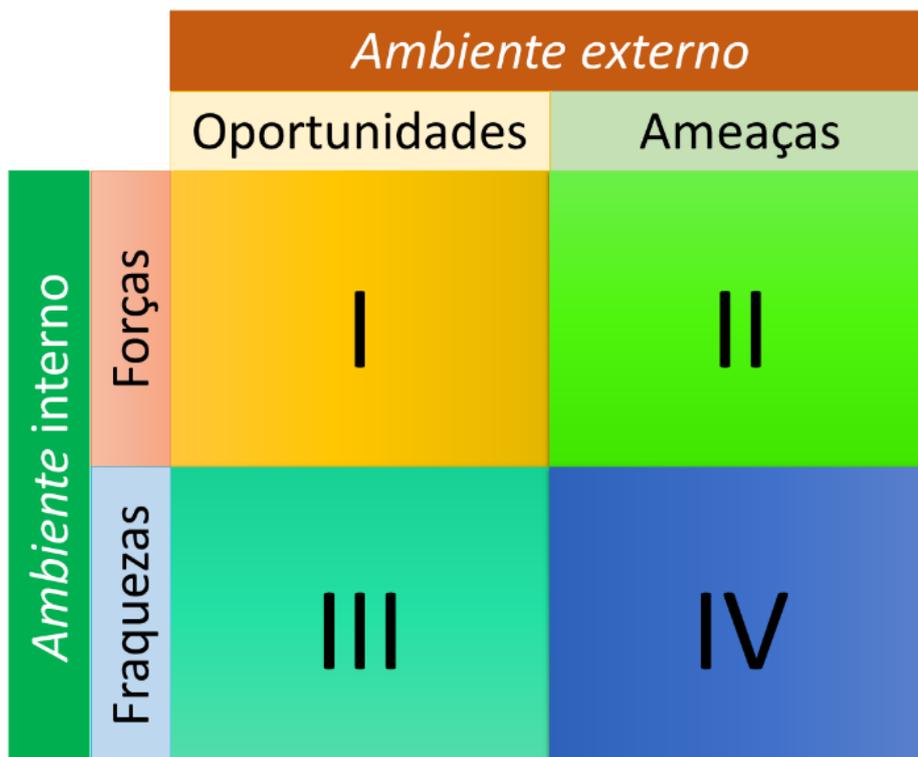


Figura 8- Matriz SWOT Cruzada

Fonte: Tachizawa e Freitas (2004) apud Fernandes (2012); Rodrigues et al. (2016), Dutra (2014) e Qualharini (2014), e na Matriz SOWT 3.0 (BORGES, 2013; LUZ, 2013)

O quadrante I indica a existência de ação ofensiva, isto é, as forças podem ajudar a aproveitar as oportunidades do mercado. Caso a tecnologia selecionada apresente fatores majoritariamente neste quadrante, corresponde a uma situação mais positiva. Caso os resultados apontem para o quadrante II, a tecnologia selecionada está sendo mantida pelas suas forças com capacidade defensiva, mas em longo prazo as ameaças, se não forem sanadas, podem inviabilizar o processo. O Quadrante III identifica o nível de debilidade da capacidade ofensiva, indicando o quanto as fraquezas podem causar problemas para o aproveitamento das oportunidades. Já no Quadrante IV, o nível de vulnerabilidade da tecnologia, considerando os aspectos sustentáveis indica quanto o conjunto de fraquezas pode amplificar o efeito das ameaças, tornando o processo ou técnica insustentável.

Entende-se que a análise de matriz cruzada sozinha é superficial e pode mascarar detalhes de interesse, portanto aplicar outros métodos em conjunto (FERNANDES, 2012), tais como: valorações, índices numéricos e validação através de experimentos. E assim podem ajudar na diminuição da superficialidade e/ou possíveis ambiguidades.

Elaborada por Kenneth Andrews e Roland Cristensen, professores da *Harvard Business School*, a análise SWOT foi criada com o propósito de verificar e posicionar a condição estratégica de determinada empresa no ambiente em que atua (MCCREADIE, 2008). Ao longo dos anos a SWOT foi utilizada para análises que incluem a verificação da posição de uma empresa no mercado, análises de produto até a escolha de parceiro ou fornecedor (KOTLER e KELLER, 2006). Porém, nos últimos anos, podem-se observar aplicações menos comuns, como identificar pontos fortes e fracos de processos e ainda avaliar o tratamento e destinação de resíduos. E pela variedade de estudos que são aplicados, a análise SWOT demonstra sua importância como um método de diagnóstico situacional para entender cada realidade e propor estratégias.

Segundo Bateman e Snell (2010), a análise SWOT é um processo consciente e sistemático de tomar decisões sobre metas e atividades que um indivíduo, um grupo, uma unidade de trabalho ou uma organização, buscarão no futuro. O tratamento de resíduos também requer a análise para se avaliar a melhor forma de pensar no futuro do planeta.

Na Tabela 4 tem-se alguns trabalhos que utilizaram a SWOT para a gestão de resíduos. Em alguns trabalhos, vale salientar, além da análise SWOT foram utilizados métodos de ponderação e priorização (OCHARÁN, 2017). Nesta revisão realizada não foram encontrados trabalhos que utilizam a matriz SWOT para avaliação de técnicas de tratamentos aplicadas aos lodos industriais ou de refinarias.

No entanto, os trabalhos de Adar et al. (2016) e Samolada e Zabaniotou (2013) utilizaram lodos de esgoto sanitário, resíduo mais próximo do LR. Fora estes, a maior parte dos trabalhos encontrados tinham os focos nos resíduos sólidos urbanos (RSU) e a melhoria do gerenciamento usualmente realizado pelo poder público (AICH e GHOSH, 2016; ENACHE, 2010; FARIA, 2011; MAJLESSI et al., 2015; SENA et al., 2015) ou na transformação em energia (BELOBORODKO et al., 2015; GOTTFRIED et al., 2018; THI et al., 2016; XINGANG et al., 2013; ZHAO e YAN, 2012); também foi expressiva a quantidade de estudo relacionando a SWOT à reciclagem (FEIJÓ et al., 2014; OCHARÁN, 2017 e RAHARJO et al., 2015).

Tabela 4- Alguns artigos que trabalharam com SWOT e gerenciamento de resíduos sólidos de 2006 a 2018

Referência	País	Objetivo
MBULIGWE e KASEVA, 2006	Tanzânia	Avaliar a gestão dos resíduos sólidos industriais e as práticas de recuperação empregadas.
ENACHE, 2010	Romênia	Conhecer pontos fracos e fortes do gerenciamento de resíduos do país.
SALIHOGU, 2010	Turquia	Avaliar o gerenciamento de resíduos industriais perigosos.
FARIA, 2011	Brasil	Reduzir consumo de água, energia e geração de resíduos sólidos na cadeia de reciclagem de plásticos no Rio de Janeiro.
ZHAO e YAN, 2012	China	Ajudar a entender <i>o status quo</i> e futuro da indústria de biomassa na China.
MOREIRA, 2012	Brasil	Diagnosticar o contexto onde se encontra uma cooperativa de catadores de resíduos sólidos a fim de facilitar suas atividades.
XINGANG; JIAOLI; BEI, 2013	China	Conhecer os fatores externos e internos que cercam o desenvolvimento do <i>shale gas</i> e seu <i>status quo</i> na China.
YUAN, 2013	China	Avaliação dos pontos fracos e fortes dos resíduos de construção na cidade de Shenzhen.
SAMOLADA e ZABANIOTOU, 2013	Grécia	Comparar técnicas para o gerenciamento mais sustentável de lodo de esgoto de estação municipal.
FEIJÓ et al., 2014	Brasil	Sugerir um modelo estratégico para uma recicladora de plásticos.
MAJLESSI et al., 2015	Irã	Estabelecer e priorizar estratégias para o melhoramento da situação real de reciclagem e a gestão de resíduos sólidos secos municipais.
RAHARJO et al., 2015	Indonésia	Melhorar as condições de centros e usinas de reciclagem e os integrar com a gestão de resíduos municipais.
BELOBORODKO et al., 2015	Letônia	Análise comparativa da estrutura organizacional do cluster da Letônia com clusters Europeus de <i>waste-to-energy</i> .

---

SENA et al., 2015	Brasil	Propor algumas opções estratégicas de atuação de coleta seletiva, programa de educação ambiental e unidade de gerenciamento de resíduos sólidos, a fim de melhorar o serviço e abrangência da prefeitura municipal.
THI; LIN; KUMAR, 2016	Vietnã/ Taiwan	Comparar técnicas de valoração de resíduos de comida na forma de bioenergia sustentável.
ADAR et al., 2016	Turquia	Comparar métodos de energia sustentáveis a partir de lodo de esgoto.
AICH e GHOSH, 2016	Índia	Identificar e selecionar a tecnologia e disposição mais sustentável para os resíduos sólidos municipais.
OCHARÁN, 2017	Brasil	Propor alternativas e um esquema que viabilize o melhoramento e/ou a implementação de empreendimentos em logística reversa pós-consumo para a reciclagem mecânica de EPS.
RATHI, 2017	Índia	Avaliar a qualidade dos relatórios de EIA gerados no país.
GOTTFRIED et al., 2018	China	Identificar vantagens e desvantagens para ajudar nas decisões dos <i>stakeholders</i> e do mercado de investimento no setor de biogás Chinês.

---

### 3. METODOLOGIA

A metodologia empregada neste trabalho envolveu uma pesquisa bibliográfica para a identificação de tipos de resíduos sólidos gerados em refinarias do Brasil e de outros países produtores de petróleo e a descrição dos métodos usuais de tratamento e destinação. Também foi realizado o levantamento de uma proposta alternativa de digestão anaeróbia para tratamento do lodo secundário gerado nos sistemas de lodos ativados de refinarias.

Em uma segunda parte do trabalho, a partir dos dados obtidos no levantamento bibliográfico (dados secundários) foi realizada a construção da matriz SWOT. Esta matriz foi construída para dar uma ótica de gestão estratégica ao tratamento escolhido como foco deste trabalho, a digestão anaeróbia. Para tal foram identificados os benefícios e as dificuldades nos ambientes internos e externos ao processo de digestão sob os aspectos técnicos, ambientais, econômicos ou sociais, de acordo com a literatura e em comparação com outras técnicas de destinação do lodo. Em seguida, foram atribuídos valores para cada um dos fatores previamente identificados, de acordo com os novos princípios de sustentabilidade compilados por este autor. A partir daí foram aplicados métodos de análises complementares como o índice de favorabilidade (IF) e matriz cruzada para ajudar na interpretação dos dados.

Na sequência do trabalho, após a caracterização e identificação do resíduo objeto do estudo, avaliou-se experimentalmente a aplicação do tratamento biológico anaeróbio do lodo secundário de um sistema de lodos ativados de refinaria, identificado, a partir de dados secundários, como uma tecnologia viável para o resíduo em questão. Para tal, foram realizados ensaios de digestão anaeróbia baseados na técnica de quantificação do Potencial Bioquímico de Metano (*Biochemical Methane Potential* - BMP), com parâmetros selecionados na pesquisa bibliográfica. Também foram realizados ensaios de codigestão do lodo secundário de refinaria com resíduo orgânico alimentar selecionado a fim de melhorar as variáveis de resultado, avaliando-se diferentes proporções de lodo de refinaria e resíduo alimentar e aplicando planejamento experimental.

Por fim, foi realizada a validação da matriz SWOT da digestão anaeróbia, com base em dados primários obtidos a partir dos experimentos de digestão e codigestão anaeróbia, aplicando um confronto teórico-experimental. Na Figura 9, é apresentada a sequência metodológica do trabalho. E nos itens seguintes são detalhadas as metodologias utilizadas.

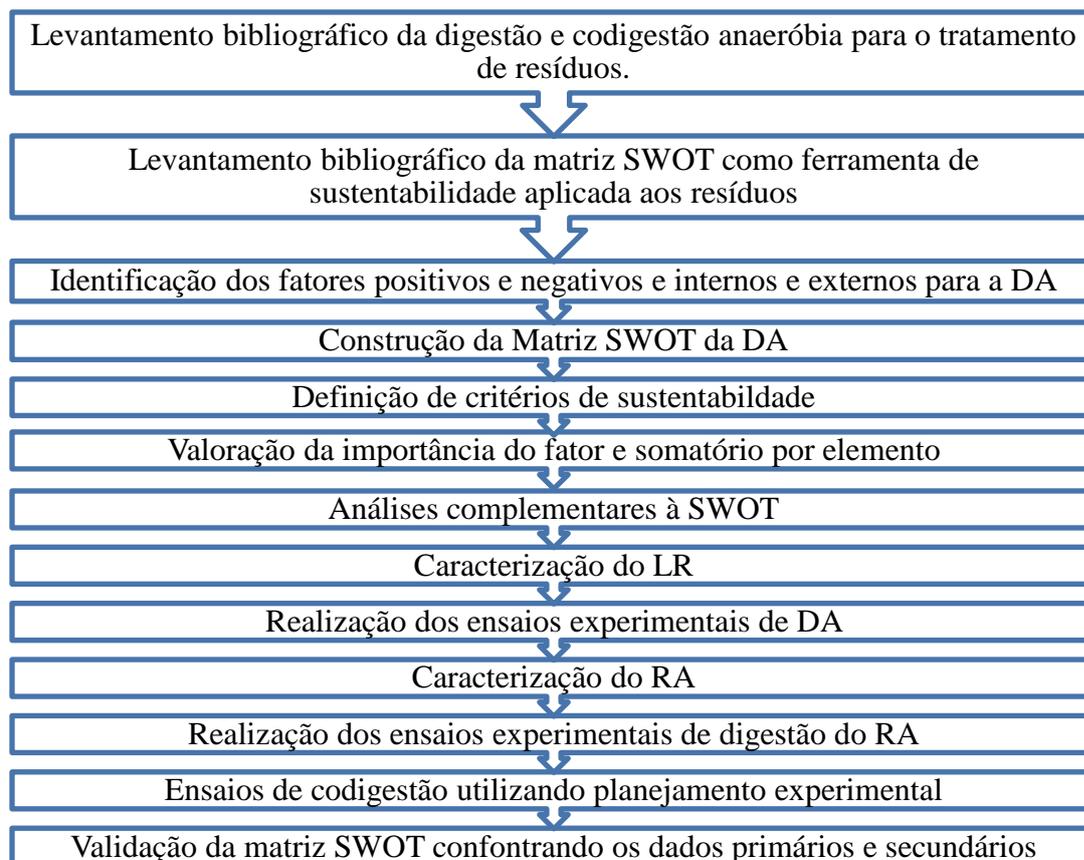


Figura 9- Sequência metodológica da dissertação. Fonte: Elaboração própria. DA = digestão anaeróbia, LR = lodo secundário de refinaria, RA = resíduo alimentar.

### 3.1. Metodologia de pesquisa

O levantamento bibliográfico foi realizado nas plataformas *Science Direct*, disponível em <http://www.sciencedirect.com>; *Web of Science* (Periódicos Capes), disponível em <http://www.periodicos.capes.gov.br/>; Scielo (*scientific electronic library on line*), disponível em <http://www.scielo.br>; Scopus, disponível em: <http://www.scopus.com>; e em bancos de dissertações e teses de universidades como Minerva – UFRJ, disponível em <http://minerva.ufrj.br>; SiBi–USP, disponível em [http://www.buscaintegrada.usp.br/primo\\_library/libweb/action/search.do](http://www.buscaintegrada.usp.br/primo_library/libweb/action/search.do); SaBi – UFRGS, disponível em <http://sabi.ufrgs.br>. Também foram pesquisadas a legislação e organizações nacionais e internacionais, tais como contidas no Ministério do Meio Ambiente, disponível em <http://www.mma.gov.br/>; Ministério de Minas e Energia, disponível em <http://www.mme.gov.br/>; FAO - *Food and Agriculture Organization*

of the United Nations, disponível em <http://www.fao.org/home/en/>; trabalhos publicados em anais de congressos, *websites* de empresas relacionadas ao setor de energia como a PETROBRAS, maior do setor no Brasil, disponível em <http://www.petrobras.com.br/pt/> e ainda diversos livros e periódicos científicos afins à área de estudo disponíveis na literatura. O levantamento foi realizado no período de 2016-2019.

### 3.2. Avaliação da digestão anaeróbia por análise SWOT

Foi realizada uma análise da tecnologia de digestão anaeróbia por análise SWOT para identificar os benefícios e as dificuldades internas e externas ao processo.

A Tabela 5 define de forma mais clara cada elemento da matriz na qual os fatores foram agrupados, baseado em Benavides (2014).

Tabela 5- Definições dos elementos da matriz SWOT

Elementos	Tipo de fator	Definição
Forças	Interno	São os pontos fortes da empresa que lhe facilitam atingir os objetivos, isto é, qualidades e capacidades humanas, administrativas, tecnológicas e econômicas que têm a organização.
Fraquezas	Interno	São os pontos fracos da empresa que constituem obstáculos internos para atingir os objetivos.
Oportunidades	Externo	São situações que se apresentam no ambiente externo da empresa e que poderiam favorecer a atingir os objetivos, isto é, tudo aquilo que ocorre no exterior da organização e que se poderia aproveitar para crescer.
Ameaças	Externo	São situações que se manifestam no ambiente externo das empresas e que poderiam afetar negativamente as possibilidades de sucesso dos objetivos, ou seja, fenômenos que surgem no ambiente externo e que põem em perigo as atividades, planos e até a organização.

Fonte: Adaptado de Benavides, 2014.

A matriz SWOT foi organizada segundo os fatores relevantes identificados a partir de dados secundários, considerando principalmente os aspectos ambientais ou técnicos da tecnologia de tratamento de lodos. Para a construção e organização da matriz SWOT, cálculo de pontuações e análise de fase foi utilizada a planilha organizacional Análise SWOT 3.0, desenvolvida por LUZ (BORGES, 2013; LUZ, 2013). Análises complementares foram expressas por

metodologia e indicativos de seus desenvolvedores, a partir dos dados inseridos pelo autor e os fatores elencados na matriz SWOT.

Para definição dos critérios de sustentabilidade considerados neste trabalho, foi feita uma análise na literatura sobre os princípios da Química Verde (ANASTAS e WARNER, 1998), os 12 princípios da Engenharia Verde (ANASTAS e ZIMMERMAN, 2003), os princípios da Engenharia Verde obtidos na conferência de San Destin (ABRAHAM e NGUYEN, 2003), os 5 princípios fundamentais da sustentabilidade (BEN- ELI, 2005) e o Critério de *Design Verde* (ARAÚJO et al., 2015), sendo realizada uma intersecção entre eles conforme na Tabela 6.

Foram estabelecidos pesos em grau de importância de 0 a 10, para cada fator positivo e a mesma valoração foi utilizada para cada fator negativo. A escolha da pontuação se deu utilizando-se critérios estabelecidos quanto à sustentabilidade, e também se considerando as principais tecnologias de destinação conhecidas para o tratamento de resíduos, especificamente para lodos de refinaria.

Os itens foram valorados, fazendo uma comparação entre os fatores avaliados do mesmo elemento SWOT. Isto é, definindo um *ranking* de importância dentre as forças, fraquezas, oportunidades e ameaças. É comum a escolha da pontuação através de pesquisas com pessoas que vivenciam o objeto estudado, sejam funcionários de empresas, trabalhadores ligados aos processos ou estudiosos sobre o assunto, porém não foi possível a aplicação nesta Dissertação devido à necessidade de um maior tempo para execução deste trabalho. Fora as pesquisas, Faria (2011) diz que não há padrão de como a pontuação deva ser aplicada, sendo encontradas formas variadas, ficando a critério do autor decidir o que mais se aplica ao seu caso, mas sempre o menor valor deve ser atribuído ao fator que apresentar menor significância para o escopo a ser estudado.

Tabela 6- Critérios de Sustentabilidade adotados para análise dos resultados na matriz SWOT.

Referência	Critérios de Sustentabilidade	(CS)	Descrição
ABRAHAM e NGUYEN, 2003; ANASTAS e WARNER, 1998; ANASTAS e ZIMMERMAN, 2003; ARAÚJO et al, 2015.	Evitar substâncias perigosas e tóxicas	1	Deve buscar menor toxicidade e periculosidade, seja em reagentes, intermediários, auxiliares (como solventes) ou subprodutos.
ABRAHAM e NGUYEN, 2003; ANASTAS e WARNER, 1998; ANASTAS e ZIMMERMAN, 2003; ARAÚJO et al, 2015; BEN- ELI, 2005.	Preferir materiais renováveis	2	Minimizar a depleção dos recursos naturais, o que pode ser alcançado pelo uso de matérias-primas (matéria e energia) renováveis no lugar de não- renováveis, através da integração dos fluxos de massa e energia ou na obtenção subprodutos renováveis.
ANASTAS e WARNER, 1998; ANASTAS e ZIMMERMAN, 2003; ARAÚJO et al, 2015.	Evitar a formação de resíduos	3	Dar preferência a não gerar um resíduo do que gerar e depois tratá-lo. Devem ser feitas opções buscando minimizar os efluentes, resíduos sólidos e emissões atmosféricas.
ANASTAS e WARNER, 1998; ANASTAS e ZIMMERMAN, 2003; ARAÚJO et al, 2015.	Promover a eficiência mássica	4	Deve-se optar por rotas de síntese tão eficientes e seletivas quanto possível, evitando desperdícios de matéria. Incorporando materiais usados do processo até o produto final.
ANASTAS e WARNER, 1998; ANASTAS e ZIMMERMAN, 2003; ARAÚJO et al, 2015.	Eficiência energética	5	Deve-se buscar eficiência energética, utilizando menos possível e considerando que diferentes fontes de energia têm diferentes impactos.
ABRAHAM e NGUYEN, 2003; ANASTAS e ZIMMERMAN, 2003; ARAÚJO et al, 2015.	Evitar desperdícios econômicos e de subprodutos.	6	Deve-se procurar a otimização de custos e a reutilização de subprodutos. Também se refere à construção de plantas e instalações, assim, devem-se evitar excessos no dimensionamento.
ANASTAS e ZIMMERMAN, 2003; ARAÚJO et al, 2015.	Abordagem holística e segura para prevenção de acidentes	7	A segurança deve ser trabalhada de maneira integrada em todo o sistema. É preferível desenhar um processo intrinsecamente seguro, a desenhar um processo com riscos que sejam contornados por soluções de segurança.
ANASTAS e ZIMMERMAN, 2003; ARAÚJO et al, 2015.	Minimizar número de etapas ou derivação.	8	Sempre que possível, deve-se buscar a simplicidade. Evitar etapas desnecessárias significa evitar riscos, custos e evitar efeitos “ <i>knock-on</i> ”.
ABRAHAM e NGUYEN, 2003; ANASTAS e WARNER, 1998; ANASTAS e ZIMMERMAN, 2003; ARAÚJO et al, 2015.	Considerar a vida útil, pós-vida do produto e desmontagem das instalações.	9	O produto ou instalação deve ser durável o suficiente para desempenhar sua função de maneira adequada, mas não deve permanecer no ambiente após o término de sua vida útil. Também se aplica à construção de instalações, que devem ser projetadas prevendo até o momento de seu descomissionamento.

ABRAHAM e NGUYEN, 2003; ARAÚJO et al, 2015.	Regionalização de processos	10	A reprodução de um processo deve levar em consideração as características ambientais, geográficas, culturais, regulatórias e sociais de cada local.
ANASTAS e WARNER, 1998; ARAÚJO et al, 2015.	Monitoramento e controle para prevenção de poluição	11	Mesmo com um design seguro, podem ocorrer falhas ou desvios no processo. Assim, para evitar a liberação de poluentes ou substâncias perigosas, deve-se adotar formas de monitoramento e controle.
ABRAHAM e NGUYEN, 2003; BEN- ELI, 2005.	Responsabilidade social e ambiental	12	Evitar impactos sociais e ambientais, isto é, efeitos deletérios sobre ecossistemas e comunidades ao redor das instalações e com os subprodutos.
ABRAHAM e NGUYEN, 2003.	Visão integrada do processo ou produto	13	Considerar não apenas eventos ou processos isolados, buscando analisar toda a cadeia produtiva de forma integrada, desde as entradas de materiais até as saídas.
ABRAHAM e NGUYEN, 2003.	Promover inovação visando a sustentabilidade	14	Promover a inovação considerando o “tripé” da sustentabilidade, isto é, aspectos sociais, ambientais e econômicos.
ANASTAS e ZIMMERMAN, 2003; ARAÚJO et al, 2015.	Complexidade pode ser um investimento quando se faz <i>green choices</i> .	15	Este critério pode ser interpretado como uma exceção dos critérios 6 e 8. Porém, neste caso, o maior número de etapas e o aumento da complexidade do processo são admitidos para elevar a sustentabilidade.
ADAR et al., 2016; ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; THI et al, 2016; VELHO et al., 2017 (*)	Maturidade tecnológica	16	Deve-se considerar que processos bem estabelecidos tecnologicamente na indústria são mais seguros, pois sua curva de aprendizado já foi realizada, favorecida pela experiência e memória documental acumulada em relação à operações e segurança.
ARAÚJO et al, 2015	Economicamente sustentável	17	Deve ser levado em consideração desde o Custo de aquisição (CAPEX) dos materiais, custo do ciclo de vida, custo de Operação, custo de serviços e manutenção até o custo do fim da vida, balanceado com os possíveis retornos de investimentos e lucros futuros, objetivando o melhor custo-benefício.

(\*) As referências utilizadas não se relacionam com as demais referências para princípios de sustentabilidade, mas foram incluídas dada sua relevância como critério e pelas citações em trabalhos de gestão ambiental.

Neste trabalho foram considerados os escopos de Rodrigues et al. (2016), Dutra (2014) e Qualharini (2014), com o objetivo de valorar, pontuar, dando pesos a cada um dos fatores das ameaças, oportunidades, fraquezas e fortalezas para formação de uma métrica única chamada de importância. A pontuação foi atribuída de maneira proporcional, como mostrado na Tabela 7. Foram utilizados os maiores valores (mais importantes) para os fatores que apresentaram alta conformidade com os critérios de sustentabilidade e os pontos mais baixos (sem importância) foram atribuídos àqueles com baixa conformidade com os critérios de sustentabilidade. Foi usada metodologia *ad hoc*, como no trabalho de Critério de Design Verde (ARAÚJO et al., 2015), para analisar a métrica importância, englobando gravidade, impacto e/ou tendência de cada fator.

Tabela 7- Pontuação utilizada nos critérios de avaliação.

Pontuação	Importância
10,0	Totalmente importante
7,5	Muito importante
5,0	Importante
2,5	Pouco importante
0	Totalmente sem importância

Em seguida, para encontrar a valoração das forças, fraquezas, oportunidades e ameaças foi feito o somatório dos valores obtidos para importância de cada um dos fatores separados por cada elemento SWOT. Utilizando estes valores obtidos para cada elemento SWOT foi possível fazer análises complementares à matriz principal, sendo neste trabalho escolhidos o índice de favorabilidade e a matriz cruzada.

Para o cálculo da métrica chamada índice de favorabilidade (IF) foi utilizada a Equação 1 (BORGES, 2013; LUZ, 2018).

$$IF = \left[ \frac{(FORÇAS+OPORTUNIDADES)}{\Sigma SWOT} - \frac{(FRAQUEZAS+ AMEAÇAS)}{\Sigma SWOT} \right] * 2 \quad \text{Eq. (1)}$$

Vale ressaltar que, segundo Luz (2013), o índice calculado desta forma pode resultar em valores em uma escala muito positiva ou muito negativa, considerando de  $0 \pm 30\%$  como resultado denominado de “equilíbrio” e a partir de 30% é considerado “favorável”, conforme apresentado na Figura 10. Borges (2013), Luz (2013) e Luz (2018) não explicam o porquê de  $\pm 30\%$  ser o corte de equilíbrio à favorável/desfavorável.



Figura 10- Classificação do índice de Favorabilidade  
Fonte: Borges (2013) e LUZ (2013).

Também foi feito um cruzamento entre todos os elementos da matriz, por quadrantes, a fim de determinar o estágio, ou fase, de cada técnica apresentada no trabalho, transformando-a em uma matriz de análise estratégica, a chamada Matriz Cruzada (Figura 8), que é considerada uma das mais importantes análises para complementar uma matriz SWOT (QUALHARINI, 2014).

Conforme metodologia adaptada de Tachizawa e Freitas (2004) e também utilizada por Rodrigues et al. (2016), Dutra (2014) e Qualharini (2014), e a Matriz SWOT 3.0 (BORGES, 2013; LUZ, 2013), foram cruzados os fatores formando quatro quadrantes: (i) forças e oportunidades; (ii) ameaças e forças; (iii) oportunidades e fraquezas; (iv) ameaças e fraquezas. E, posteriormente, foi feita a soma da valoração dos fatores por par cruzado e o maior valor revela a situação atual da técnica.

O cruzamento e somatório foram realizados, pois é uma maneira de tornar quantitativo o efeito de um fator no outro, isto é, o aproveitamento de um elemento para diminuir a dificuldade do outro, como uma anulação de pontos negativos através de pontos positivos, ou potencializar melhorias através da soma de fatores positivos. Foi realizada a análise desta anulação ou potencialização conforme Qualharini (2014), utilizando perguntas no cruzamento. Por exemplo: “Como potencializar sua força como esta oportunidade?” e “Como minimizar sua ameaça com sua força?”.

### 3.3. Avaliação experimental da digestão e codigestão de lodo de refinaria

#### 3.3.1. Amostragem e caracterização do lodo de refinaria

O principal resíduo avaliado no estudo foi o lodo secundário proveniente de um sistema de lodos ativados em operação em uma estação de tratamento de efluentes de uma refinaria de petróleo. O lodo foi amostrado em julho de 2017, após a etapa de desaguamento por centrifugação, diretamente da caçamba que seguiria para disposição em aterro (Figura 11).



Figura 11-Amostra de lodo aeróbio de refinaria recebido no laboratório e empregado no estudo  
Fonte: Fotografia por T.M.S.Castro em julho/2017.

Após retirada de alíquota para análises de caracterização (pH, umidade, densidade, concentração de sólidos, carbono, nitrogênio, fósforo, óleos e graxas, hidrocarbonetos e metais, e análise termogravimétrica), empregando-se metodologias padrão apresentadas no item 3.3.6, o lodo foi armazenado a 4°C até o momento de uso.

### **3.3.2. Ensaio de digestão anaeróbia do lodo**

Com o propósito de seguir um procedimento operacional padrão, após o levantamento das condições de condução dos métodos de quantificação do potencial bioquímico de metano (BMP), apresentados no item 2.5 da revisão bibliográfica, adotou-se uma metodologia para os ensaios de digestão anaeróbia.

Os ensaios foram conduzidos em frascos penicilina de 100 mL, com volume útil (90 ou 50 mL) composto de lodo de refinaria (LR) e inóculo (I) nas razões de inóculo por substrato (I/S) 1 e 2 (em g/g de SV). O pH desta mistura foi ajustado com  $\text{NaHCO}_3$  para valores de  $7,0 \pm 0,2$ .

O lodo anaeróbio utilizado como inóculo foi coletado em reator anaeróbio tipo UASB (*upflow anaerobic sludge blanket* – reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente) em operação em indústria de abate de aves localizada na cidade do Rio de Janeiro. Uma alíquota foi tomada para quantificação de umidade, pH e sólidos (totais, voláteis e fixos), empregando-se metodologias padrão descritas no item 3.3.6, sendo o restante armazenado a 4°C até o momento de uso.

Os ensaios de digestão anaeróbia foram divididos em duas etapas experimentais. Na Etapa 1, o LR foi caracterizado e utilizado como recebido (lodo muito adensado, obtido após centrifugação), sendo empregado um volume útil de 90 mL. Na Etapa 2, o LR foi diluído na proporção de 1:4 (volume de lodo: volume de água destilada) para reduzir a concentração de sólidos ao valor obtido antes da centrifugação (lodo com características mais adequadas para a digestão) e foi empregado um volume útil de 50 mL.

Nestas duas etapas, além dos testes com diferentes valores de I/S, foram realizados controles contendo somente o lodo anaeróbio empregado como inóculo, na mesma quantidade empregada nos frascos com as misturas de lodo de refinaria e inóculo. Tais controles tiveram a finalidade de verificar a produção de biogás oriunda do inóculo e descontar esta produção da obtida nas misturas de LR e inóculo. Também foi realizado um controle contendo somente lodo de refinaria para verificação do efeito da adição de inóculo na DA. Sendo assim, para as etapas 1 e 2 foram definidas cinco condições experimentais, conforme detalhado na Tabela 8.

Tabela 8- Condições experimentais avaliadas nos ensaios de digestão anaeróbia do LR.

Condições	Resíduo	Razão I/S
C1	Controle – LR	-
C2	Controle – Inóculo	2 <sup>a</sup>
C3	Controle – Inóculo	1 <sup>b</sup>
C4	LR + Inóculo	2
C5	LR + Inóculo	1

<sup>a</sup> Somente inóculo, utilizando a mesma massa de inóculo adicionada para a razão I/S da condição 4. <sup>b</sup> Somente inóculo, utilizando a mesma massa de inóculo adicionada para a razão I/S da condição 5.

Uma alíquota de cada condição foi retirada para as análises iniciais e o volume útil transferido para os frascos, que foram lacrados com batoques de borracha e lacres de alumínio, e incubados a  $35 \pm 1^\circ\text{C}$  até estabilização da produção de biogás (45 dias). O volume de biogás foi medido diariamente por deslocamento do êmbolo das seringas plásticas de 60 mL conectadas em cada um dos frascos com escalpes e agulhas acopladas ao selo de borracha

(Figura 12). Ao fim do experimento (45 dias), o gás presente nas seringas foi transferido para ampolas gasométricas e submetido à posterior análise do conteúdo de metano por cromatografia em fase gasosa. A produção específica de biogás (PEB) foi determinada pela razão entre o volume de biogás produzido e a massa inicial ou removida dos sólidos voláteis totais. Além da PEB, a digestão foi avaliada por análises de sólidos totais voláteis, pH, acidez volátil e alcalinidade, em 3 réplicas de cada condição, empregando-se metodologias padrão (APHA, 2005) descritas no item 3.3.6.



Figura 12- Frascos penicilina com seringa acoplada para quantificação do biogás produzido.  
Fonte: Fotografia por T.M.S.Castro em Dezembro/2017

### 3.3.3. Amostragem e caracterização do resíduo alimentar

Outro resíduo utilizado no estudo foi um resíduo orgânico alimentar domiciliar, rico em carboidratos (composto de restos do preparo de frutas, vegetais, legumes e verduras). Após coleta, seu conteúdo foi manualmente segregado, para quantificação do peso úmido de cada alimento identificável (batata, cenoura, laranja etc). Em seguida, todas as frações obtidas foram novamente reunidas e a mistura processada em liquidificador doméstico na velocidade máxima, com adição de água destilada o suficiente para a trituração, conforme descrito em Silveira (2016). A mistura triturada, daqui em diante denominada resíduo alimentar (RA), foi armazenada sob refrigeração (4°C) até realização das análises de caracterização, conforme metodologias padrão descritas no item 3.3.6, e o restante preservado em freezer (-20°C) até o momento de uso no decorrer do trabalho.

Na Figura 13 são apresentadas fotos dos restos de alimentos amostrados até o resíduo alimentar pronto e armazenado. O resíduo alimentar foi caracterizado em termos de pH, umidade, densidade, concentração de sólidos, carbono, nitrogênio, fósforo, óleos e graxas, hidrocarbonetos, carboidratos e proteínas.



Figura 13- Etapas de obtenção do resíduo alimentar: (a) Resíduo orgânico alimentar domiciliar recebido no laboratório; (b) resíduo segregado manualmente; (c) trituração do resíduo; (d) resíduo alimentar obtido após trituração; (e) e (f) resíduo alimentar para armazenamento.

Fonte: Fotografia por T.M.S.Castro em outubro/2017

### 3.3.4. Ensaios de digestão anaeróbia do resíduo alimentar

Para estabelecer a melhor proporção de resíduo alimentar (RA) na mistura com lodo de refinaria, que ocorreu na etapa experimental de codigestão, um ensaio preliminar foi realizado apenas com resíduo alimentar como substrato. O ensaio, denominado Etapa Experimental 3, foi realizado conforme descrito para os ensaios de digestão anaeróbia do lodo de refinaria (item 3.2), substituindo o lodo de refinaria por resíduo alimentar, conforme detalhado na Tabela 9. Neste caso, triplicatas de frascos penicilina com volume útil de 50 mL foram incubados a  $35 \pm 1^\circ\text{C}$  até estabilização da produção de biogás (45 dias).

Tabela 9 - Condições experimentais avaliadas nos ensaios de digestão anaeróbia do RA.

Condições	Resíduo	Razão I/S
C1	Controle – RA	--
C2	RA + Inóculo	2
C3	RA + Inóculo	1

### 3.3.5. Ensaios de codigestão anaeróbia de lodo de refinaria e resíduo alimentar:

#### Planejamento experimental

A fim de avaliar a melhor condição de mistura dos dois resíduos e obter um resultado mais representativo, optou-se por realizar um planejamento experimental (Etapa experimental 4), que englobou as variáveis de maior influência no resultado final das etapas experimentais anteriores. Este ensaio também foi realizado em frascos penicilina de 100 mL com volume útil de 50 mL, incubados a  $35 \pm 1^\circ\text{C}$  até estabilização da produção de biogás (45 dias). As análises iniciais, condições de incubação e quantificação de biogás foram realizadas da mesma forma que nos experimentos de digestão anaeróbia descritos no item 3.3.2.

Adotou-se um planejamento experimental do tipo fatorial completo de 3 variáveis e dois níveis (arranjo  $2^3$ ). As variáveis independentes estabelecidas foram a razão I/S, o percentual de RA na mistura e a diluição do LR (volume de lodo: volume de água destilada), denominadas X1, X2 e X3 na Tabela 10. O nível (-1) das variáveis X1, X2 e X3 corresponde aos ensaios sem adição de inóculo, sem adição de RA e sem diluição do LR, respectivamente. Enquanto o nível (1) representa condições limites de adição de inóculo (I/S 2) ou resíduo alimentar (20%) na mistura, e de concentração inicial de lodo (diluição 1:4). Os níveis reais de razão de inóculo (X1) e diluição de LR (X3) foram escolhidos de acordo com as variações utilizadas nos experimentos prévios de digestão. Já para o nível real de resíduo alimentar (X2) foi tomado como base o estudo de Ferreira (2017).

Tabela 10- Codificação e definição dos níveis a serem estudados no planejamento de experimentos fatorial completo  $2^3$  do planejamento experimental

Variável codificada	Variável real	Nível codificado	Nível real
X1	Razão de Inóculo (I/S)	-1	0
		1	2
X2	% de RA	-1	0
		1	20
X3	Diluição do LR	-1	0
		1	1:4

Na Tabela 11 é apresentada a ordem e número total de ensaios executados no decorrer do planejamento experimental, sendo cada um deles analisados com média de três ou quatro frascos, totalizando 8 experimentos (C1 a C8). Um experimento, em quintuplicata, foi conduzido na condição do ponto central (C9). Foi selecionada como variável de resposta do planejamento experimental a remoção de sólidos voláteis (SV). Além disso, durante o desenvolvimento dos ensaios experimentais, outras variáveis de interesse do processo também foram registradas, sendo estas a produção específica de biogás (PEB), o pH inicial e final do meio, e a concentração de SV inicial e final do meio.

Tabela 11- Corridas experimentais realizadas no planejamento experimental 2<sup>3</sup>

Condições	Variáveis codificadas		
	X1	X2	X3
C1	-1	-1	-1
C2	-1	-1	1
C3	-1	1	1
C4	1	1	1
C5	1	-1	-1
C6	1	1	-1
C7	-1	1	-1
C8	1	-1	1
C9 -13	0	0	0

A identificação e seleção das variáveis de maior efeito na remoção de SV foram realizadas aplicando-se a metodologia de análise de variância – ANOVA (GUTIÉRREZ PULIDO e DE LA VARA SALAZAR, 2008; MONTGOMERY, 2001) aos dados experimentais obtidos no planejamento experimental. Adicionalmente, os efeitos associados a cada uma das variáveis avaliadas e obtidos mediante a realização da ANOVA foram apresentados na forma de diagramas de Pareto dos efeitos padronizados, a fim de facilitar a interpretação dos resultados obtidos no tratamento estatístico aplicado sobre os dados experimentais. O grau de nível de confiança utilizado para avaliar a significância do efeito de cada uma das variáveis estudadas sobre as variáveis de resposta mencionadas anteriormente foi de 95% ( $\alpha=0,05$ ). Os parâmetros estatísticos usados para a análise de significância de cada um dos efeitos principais estudados sobre as variáveis de resposta selecionadas foram o estatístico F0 e o valor-p (GUTIÉRREZ PULIDO e DE LA VARA SALAZAR, 2008; MONTGOMERY, 2001). A análise estatística dos resultados foi realizada usando o *software Statistica 7.0*.

Para determinar a melhor condição para o tratamento por digestão ou codigestão usando LR e RA o tipo de planejamento experimental utilizado nesta etapa baseou-se nas metodologias

de superfície de resposta, fixando-se sempre a variável restante ao cruzamento no ponto central (GUTIÉRREZ PULIDO e DE LA VARA SALAZAR, 2008), visando identificar a influência das variáveis selecionadas sobre as variáveis de resposta.

### 3.3.6. Métodos analíticos

Os métodos empregados para determinação dos parâmetros de caracterização dos resíduos e também de monitoramento dos ensaios de digestão anaeróbia são apresentados na Tabela 12.

Tabela 12- Análises realizadas e seus respectivos métodos analíticos

Análise	Método	Equipamento	Referência
pH	Potenciométrico	pHmetro QUIMIS, mod. Q400AS	JARAMILLO, 1996
Umidade	Gravimétrico	Analizador infravermelho IV 2000 GEHAKA	APHA, 2005
Densidade Sólidos	Método da proveta Gravimétrico	Balança OHAUS Balança OHAUS e Estufa QUIMIS	EMBRAPA, 2011 APHA, 2005
N e C	Pregl-Dumas	Analizador elementar PE 2400 Series II CHNS/O	THOMPSON, 2008
P	Digestão c/ persulfato – ácido ascórbico	Espectrofotômetro HACH DR 3900	APHA, 2005
O&G e Hidrocarbonetos	Gravimétrico	Aparelhagem de extração Soxhlet e Balança OHAUS	APHA, 2005
Carboidratos	Colorimétrico	Espectrofotômetro HACH DR 3900	DUBOIS et al., 1956
Proteínas	Colorimétrico	Espectrofotômetro HACH DR 3900	LOWRY et al., 1951
Metais	Digestão c/ HNO <sub>3</sub> e chama direta de ar-acetileno	Espectro de Absorção Atômica 240 FS AGILENT	APHA, 2005
TGA	Termogravimétrico	TGA Q-500	Software Universal V4.5 <sup>a</sup> TA Instruments
DQO	Colorimétrico	Espectrofotômetro HACH DR 3900	APHA, 2005
AGV	Titulométrico	888 titrando METROHM	DILALLO e ALBERTSON, 1961
Alcalinidade	Titulométrico	888 titrando METROHM	RIPLEY et al., 1986

### **3.4. Reavaliação da matriz SWOT a partir de dados primários da digestão anaeróbia**

Em todo o trabalho, a matriz SWOT foi construída para a avaliação do processo de digestão anaeróbia que foi baseada em características apresentadas na literatura e para o tratamento de um resíduo genérico. Isto é, além da utilização de dados secundários, também não foram consideradas as limitações ou particularidades do resíduo estudado, o lodo secundário obtido dos sistemas de tratamento de efluentes de refinarias de petróleo.

De acordo com Gottschall (2004), que estudou os pensadores desde os primeiros estudos acerca de métodos científicos datados, afirma que Descartes, assim como Galileu, já defendiam que o uso de experimentos é sempre relevante para validar matematicamente conclusões baseadas em teorias. Segundo estes autores, experimentar torna uma sentença válida como definição do fenômeno, visto que não se permitem interpretações pessoais.

Foi realizada uma comparação dos dados secundários com os primários obtidos nas etapas experimentais deste trabalho. Assim, buscou-se verificar se as informações obtidas na Análise SWOT se confirmam, são refutadas ou inclusivas para o LR ou, ainda, se são observados pontos discordantes da literatura que foram colocados na matriz SWOT genérica para DA. A validação da matriz SWOT da DA foi conduzida através de comparação fator a fator com os resultados e observações técnicas das etapas experimentais, incluindo os experimentos de codigestão, sendo realizada uma validação de confronto teórico-experimental.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Matriz SWOT da digestão anaeróbia: avaliação teórica**

Nesta etapa do trabalho foi realizada uma avaliação mais aprofundada da digestão anaeróbia, utilizando a ferramenta de gestão estratégica matriz SWOT. A matriz foi construída após a identificação dos fatores considerados ameaças, oportunidades, fraquezas e forças da digestão anaeróbia, segundo a literatura. Na Figura 14 é apresentada a lista destes fatores indicados para cada elemento SWOT, considerando os fatores internos e externos.

Através da matriz SWOT tem-se uma visão geral das forças, fraquezas, oportunidades e ameaças para a digestão anaeróbia. Podendo-se observar, em um primeiro momento, que o processo de digestão anaeróbia apresenta mais vantagens, ou seja, mais aspectos relacionados a força e oportunidades, que desvantagens. Mas é necessária uma análise mais sistêmica para entender o que estes fatores podem representar.

A sustentabilidade de tecnologias de tratamento e disposição de resíduos sólidos depende de fatores multidimensionais, como condições climáticas, impactos ambientais causados, condições econômicas e financeiras, condição social e política. Uma tecnologia torna-se sustentável quando é tecnicamente adequada, financeiramente viável, economicamente benéfica e socialmente aceita (AICH e GHOSH, 2016).

Sendo assim, com o objetivo de definir os fatores mais importantes, aqueles que levam à maior sustentabilidade (aspectos ambientais, econômicos e sociais), e os menos importantes, os fatores que contribuem com a não sustentabilidade da digestão anaeróbia, foi possível atribuir valores. Estes valores foram estabelecidos de acordo com critérios de sustentabilidade, definidos através da interseção dos princípios de sustentabilidade dispostos na literatura compilada pela autora dessa Dissertação (Tabela 6), e com aspectos técnicos definidos na literatura. Quando necessárias, avaliações relativas frente a outras tecnologias foram utilizadas como referencial para a destinação de lodos, tais como a disposição direta em aterros e a incineração.

Fatores internos	Forças (S)		Fraquezas (W)	
	S1	Produção de biogás (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; METCALF e EDDY, 2014)	W1	Produtos gerados necessitam de pós-tratamento ou purificação (ADAR et al., 2016; ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; THI et al, 2016)
S2	Tecnologia madura (ADAR et al., 2016; ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; THI et al., 2016)	W2	Alto controle operacional (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; CHERNICHARO, 2007; METCALF e EDDY, 2014)	
S3	Redução do odor no digerido (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; METCALF e EDDY, 2014)	W3	Entrada de energia inicial para o aquecimento (ADAR et al., 2016; FOLADORI; ANDREOTTOLA; ZIGLIO, 2010)	
S4	Pode suprir a demanda energética ao longo do processo (ADAR et al., 2016)	W4	Custo inicial alto (ADAR et al., 2016; METCALF e EDDY, 2014)	
S5	Reduz a carga orgânica em até 65% (ADAR et al., 2016; ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014)	W5	Tempo de operação longo (METCALF e EDDY, 2014)	
S6	Ocupa pequenas áreas (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; CHERNICHARO, 2007)			
S7	Não precisa de secagem ou desidratação posterior (ADAR et al., 2016)			
S8	Redução de patógenos (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014, FOLADORI; ANDREOTTOLA; ZIGLIO, 2010)			
Fatores externos	Oportunidades (O)		Ameaças (T)	
	O1	Possível comercialização do biogás (ADAR et al., 2016; THI et al, 2016)	T1	Depende muito do fluxo de material de entrada no processo (AICH e GHOSH, 2016; METCALF e EDDY, 2014; THI et al, 2016)
	O2	Digerido pode ser usado para melhorias nos solos (THI et al., 2016; ADAR et al., 2016; METCALF e EDDY, 2014)	T2	Limitado pelas condições climáticas (ADAR et al., 2016; AICH e GHOSH, 2016)
	O3	Credito de Carbono (ADAR et al., 2016; THI et al, 2016)	T3	Não há legislação específica para uso dos digestores (THI et al., 2016)
	O4	Redução do custo de disposição final por redução da massa e volume do digerido. (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; FOLADORI; ANDREOTTOLA; ZIGLIO, 2010; METCALF e EDDY, 2014)	T4	Riscos de vazamento de gás e explosão (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014)
	O5	Aceita combinações de resíduos – codigestão (FOLADORI; ANDREOTTOLA; ZIGLIO, 2010)		
	O6	Incentivos da legislação internacional (AICH e GHOSH, 2016)		
	O7	Não há restrições de localização (AICH e GHOSH, 2016)		

Figura 14- Matriz SWOT da digestão anaeróbia.

A valoração por meio da métrica chamada de importância imprime um peso que é o grau de relevância (juntando a gravidade, impacto e/ ou tendência) de cada fator perante o cenário e sua contribuição para uma gestão mais sustentável e capacidade técnica/operacional. É analisada pela consideração da gravidade ou urgência de acordo com o atendimento ou não aos critérios de sustentabilidade, pela intensidade ou impacto que o fator pode causar ou pela ausência dele. E ainda, observa-se a projeção perante suas possíveis flexibilizações ou restrições e pressões do ambiente externo no futuro, a tendência. Também são consideradas as características específicas para cada elemento, como mostra a Figura 15.



Figura 15- Características que influenciam no peso dos critérios de sustentabilidade.  
Fonte: Elaboração própria.

Nas Figura 16 a 20, tem-se a valoração atribuída de acordo com a importância e cada elemento SWOT e a discussão do *ranking* dos valores partindo da análise dos fatores frente aos critérios de sustentabilidade (CS).

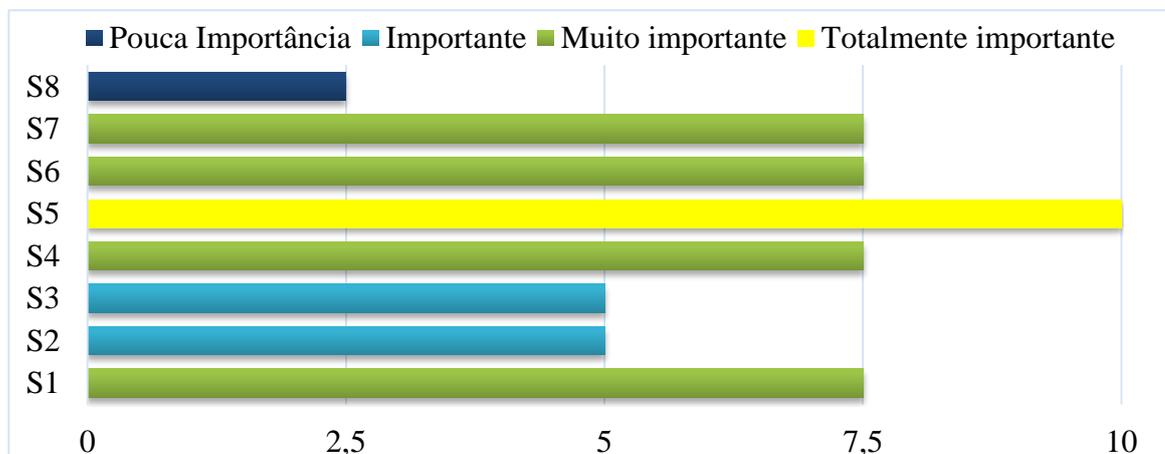


Figura 16- Valorações de importância das Forças da tecnologia de digestão na análise SWOT.  
S1= Produção de biogás, S2= Tecnologia madura, S3= Odor do digerido, S4= Supre energia do processo, S5= Menor carga orgânica, S6= Ocupação de áreas pequenas, S7= Secagem e desidratação e S8= Redução de patógenos.

O principal objetivo do tratamento por digestão anaeróbia é a busca por redução do grau poluidor, ou seja, redução da concentração de matéria orgânica. Este fator (S5) foi considerado uma força totalmente importante. De acordo com a literatura, a redução pode chegar a até 65% (ADAR et al., 2016; ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014). Este conceito, que define a aplicação da tecnologia do tratamento, já bem estabelecido (CS 16). Ademais, a partir de fiscalização mais intensa para atendimento à PNRS, não haverá possibilidade de disposição de resíduos em aterros, apenas sendo permitido os rejeitos (CS 6). Se há matéria orgânica a ser reduzida, ainda é necessário o tratamento e vetada a sua disposição (CS 12), o que agrega mais importância à preferência por tratamentos (CS 3) como a digestão.

Quando comparada à principal forma de destinação dos resíduos no Brasil, os aterros, pode-se dizer que a DA ocupa pequenas áreas (S6). Esta força é considerada muito importante, visto todos os entraves à ocupação de grandes áreas atualmente. É uma vantagem que se repete em todas as referências encontradas para DA, que se torna uma alternativa ao uso desnecessário de áreas que poderiam ser úteis para outros fins. Logo, a economia de escala é estimulada quando se pensa em sustentabilidade, contribuindo do ponto de vista do desperdício da área em si (CS 6), também diminui o transporte até as áreas que geralmente são afastadas dos centros urbanos por falta de espaço nas metrópoles e pela oposição da população no que se refere a ter aterros próximos de regiões urbanas (CS 12 e 13). E ainda, áreas de plantas de digestão podem ser descomissionadas facilmente (CS 9), enquanto os aterros podem ser inutilizados por anos e promover desvalorização de seu entorno (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014).

Também considerada muito importante, tem-se a produção de biogás (S1) e a sua utilização que pode suprir a demanda energética de operação (S4). O fator S1 é um dos que mais agrega valor ao processo de DA, pois possibilita a transformação do resíduo em energia limpa (CS 2, 6, 13 e 15). A partir deste fator as oportunidades O1 e O3 são identificadas e ainda possibilita a força S4.

Promover um ciclo fechado de energia, utilizando o biogás para suprir os gastos de energia do próprio processo é interessante, pois uma das maiores demandas energéticas da DA é o aquecimento durante a operação. A não necessidade do uso de fontes externas de energia (CS 6) e a substituição do uso de energia não renovável (CS 2) também é um resultado significativo. A recuperação do biogás dentro da planta é interessante, pois a recuperação fora da planta de digestão seria mais dispendiosa e complexa, pela necessidade de transporte do gás (CS 3 e 13).

Em contrapartida, entende-se que dificilmente ocorrerá a substituição total da energia demandada.

Após os tratamentos de resíduos, são comuns etapas de desaguamento e/ ou desidratação. Adar et al. (2016) mostram que para a DA de lodos de esgoto poderia não ser necessário. Esta não necessidade seria também muito importante, pois promove a diminuição de etapas no processo (CS 8) e, conseqüentemente, diminui a economia de custos (CS 17) e gastos de energia em decorrência das etapas de secagem (CS 5 e 6).

Uma característica considerada como uma força importante é o fato da DA ser uma tecnologia considerada madura (S2). Segundo Velho et al. (2017), consideram-se que processos bem estabelecidos tecnologicamente na indústria são mais seguros, pois sua curva de aprendizado já foi realizada (CS 16). O amplo conhecimento desta tecnologia, que se tem relatos de estudos desde a década de 60 (PERES et al., 1991), traz benefícios, pois ajuda a neutralizar ou diminuir o impacto de diversas fraquezas, ameaças e desperdícios do processo (CS 6, 7 e 11). Esta técnica já foi observada, estudada e as limitações e/ou fatores que a influenciam são amplamente conhecidos, discutidos e com *expertise* desenvolvida para tratamento dos pontos negativos.

Outro fator definido como de média importância é a diminuição do odor do digerido (S3), em relação ao odor do lodo *in natura*, sem tratamento. Embora não seja determinante para o sucesso ou inviabilização da DA, é considerada uma força, pois pode influenciar na localização de uma unidade de tratamento, principalmente no que diz respeito à opinião pública para a abertura de novas instalações ou uma zona urbana próxima. Segundo Andreoli, von Sperling; Fernandes (2014) e Metcalf e Eddy (2014), é descrito que se o tratamento for feito corretamente, o lodo digerido e estabilizado exala bem menos odor que o resíduo *in natura*, trazendo mais uma vantagem ao processo. Vale ressaltar que os aterros caracteristicamente exalam odores, fruto tanto da decomposição como do lixiviado (AZEVEDO, 2004). E a incineração, se utilizada como forma de destinação do lodo, ainda que em menor escala, segundo Mucciaccito (2014), também emana odores através das emissões de gases produzidos na queima.

A última força que foi elencada, considerada como de baixa importância, é a redução de patógenos (S8). Foi assim definida, pois não elimina a etapa de desinfecção, quando necessária para o tipo de resíduo, mas proporciona uma menor remoção de patógenos. Embora não seja um dos objetivos do tratamento por DA, pode ser encarada como uma vantagem extra, pois

pode reduzir gastos com redução da patogenicidade e reduzir prejuízos à saúde humana, em caso de não tratamento do resíduo final (CS 11 e 12).

A Figura 17 mostra os resultados de valoração de importância para as fraquezas dos aspectos apontados na matriz SWOT.

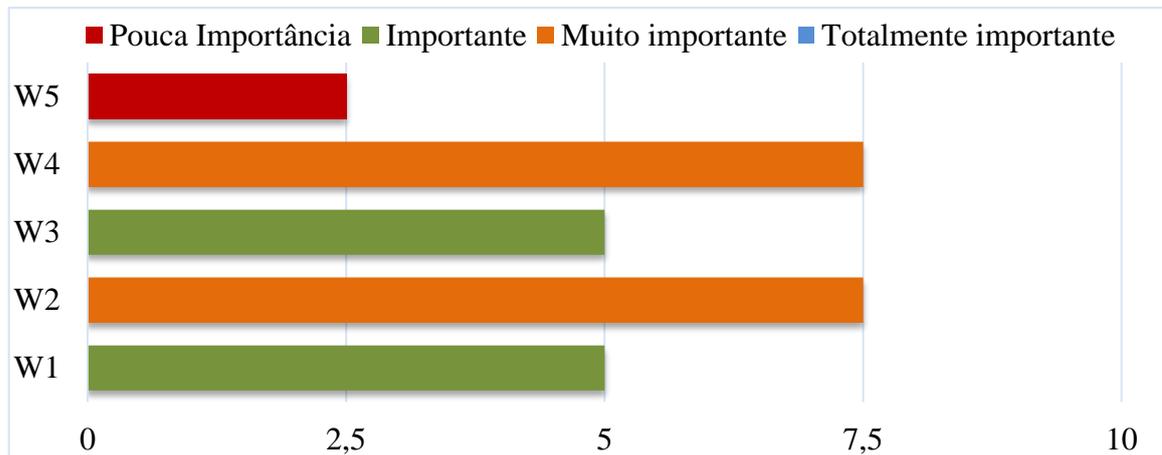


Figura 17- Valorações de importância das Fraquezas da tecnologia de digestão na análise SWOT. W1= Pós-tratamento e purificação, W2= Controle operacional, W3= Energia inicial, W4 = Custo inicial e W5= Tempo de operação.

Foram consideradas as fraquezas “alto controle operacional” (W2) e “Custo inicial alto” (W4) como muito importantes. A primeira gera um ponto de atenção todo o tempo, devido à possibilidade de complicações no processo e necessidade de pessoal treinado para a obtenção de bons resultados. Se a tecnologia não for bem controlada pode-se prejudicar o tratamento, principalmente em termos de eficiência. A segunda refere-se ao custo, que é considerado alto quando comparado aos aterros, porém menor que o da incineração (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; GINESTET, 2007). Esses dois elementos ocorrem principalmente nos estágios iniciais, onde há necessidade de gastos elevados com energia e a construção da planta de tratamento. Ambos os fatores se relacionam com a sustentabilidade através de prejuízos aos CS 6 e 17 que tratam de aspectos econômicos.

A fraqueza definida como gasto de entrada de energia inicial para o aquecimento (W3) refere-se à necessidade de elevar a temperatura de todo o volume do reator a valores ideais, despendendo grande quantidade de energia. Isto pode ser considerado contrário à eficiência energética em um primeiro momento como colocado como um benefício no tratamento por DA, caracterizando-se como um desperdício de energia (CS 5). No entanto, foi atribuído como nível mediano de importância, pois o uso de energia tende a diminuir ao longo da operação, podendo

até suprir a demanda energética, como visto na S4. Este fator contribui significativamente com os custos iniciais da DA (W4), já mencionados.

Para utilização do biogás gerado no processo é necessária a inclusão de etapas (CS 8) para sua purificação, que é considerada uma fraqueza (W1) do processo. Mas, este fator tal como o acima, pode ser minimizado, sendo por isto lhe atribuído o nível médio de importância. Segundo o CS 15, a inclusão da etapa de utilização do biogás no processo pode ser uma desvantagem, contudo é uma *green choice* (ANASTAS e ZIMMERMAN, 2003; ARAÚJO et al, 2015), pois confere aumento na sustentabilidade alinhado com os CS 4, 6 e 13 e o uso do biogás se torna uma importante força como já detalhado acima.

Meltcalf e Eddy (2014) expõem como uma desvantagem o longo tempo de operação do processo de biodigestão, comparado com o de outras tecnologias. O tempo necessário para o tratamento pode ser, em média, 30 dias. Sendo assim, entende-se como uma fraqueza, pois se deve considerar que para o tratamento de elevadas quantidades de resíduos, o elevado tempo de operação pode levar à necessidade de mais unidades para tratamento, ocupando maior área. No entanto, de pouca importância, pois não vai contra diretamente os CS e nem impede a DA de ser executada. Mas pode acarretar desvantagens em decorrência deste fator.

A Figura 18 mostra os resultados de valoração de importância para as oportunidades dos aspectos apontados na matriz SWOT.

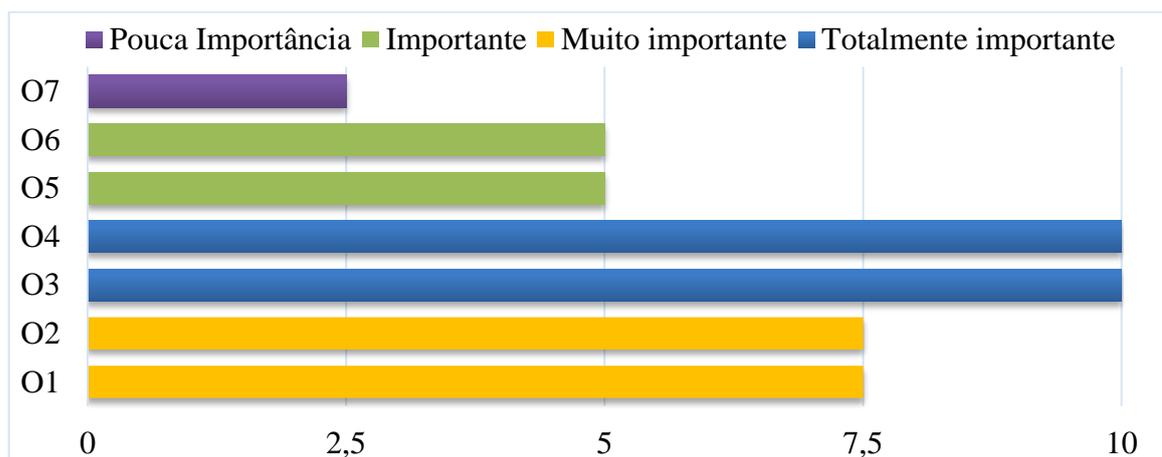


Figura 18- Valorações de importância das Oportunidades da tecnologia de digestão na análise SWOT. O1= Comercialização do biogás, O2- Digerido usado nos solos, O3= Crédito de carbono, O4= Custo da disposição final, O5= Combinações de resíduos, O6= Legislação internacional e O7= Restrições de localização.

Um dos fatores considerados como totalmente importantes é a redução de massa e volume do resíduo a ser encaminhado para disposição final (O4), o que acarretaria benefícios ao

processo, entre eles a diminuição de custos de transporte (CS 17), uma vez que a quantidade de resíduo seria menor que a usual nestes processos (CS 3), contribuindo com as recomendações para minimização de resíduos da PNRS. E ainda atua em aderência ao CS 12, pois o transporte de cargas no Brasil, em sua grande maioria, é feita pelo modal rodoviário, importante colaborador para as emissões de Gases de Efeito Estufa (IEMA, 2016), sendo sua redução também benéfica ao meio ambiente.

Para as oportunidades muito importantes elencadas, tem-se também a possibilidade da comercialização do biogás (O1) que pode ser transformado em energia elétrica, trazendo benefícios econômicos, ambientais e sociais (ADAR, 2016; THI et al., 2016). A utilização dessa forma de energia pode ser ainda mais significativa em comunidades mais carentes, presentes em grandes centros brasileiros.

Na assinatura do Protocolo de Kyoto foram criados os incentivos de mecanismos de desenvolvimento limpo (MDL) através da medição dos gases de efeito estufa (GEE). A utilização da tecnologia de DA e o uso do biogás pode permitir a obtenção de créditos de carbono (O3) com Certificados de Redução de Emissões, tornando-se uma oportunidade importante pelo seu caráter estratégico (CS 17). Este aproveitamento do biogás se alinha com vários critérios de sustentabilidade, principalmente quanto a sua promoção (CS 15), e evita o descarte do biogás gerado na atmosfera (CS 6). Ainda, podem-se destacar os interesses políticos do país por estar contribuindo para o benefício tratado mundialmente.

A outra oportunidade definida como muito importante é quanto à utilização do lodo digerido como fertilizante para melhoria dos solos (O2). Uma vez que o mesmo está mais estabilizado talvez pudesse ser usado em aplicações em solos para agricultura, como já ocorre com os lodos de esgoto (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; FOLADORI; ANDREOTTOLA; ZIGLIO, 2010; METCALF e EDDY, 2014). Ambos os fatores, comercialização de biogás e possibilidade de aplicação do lodo estabilizado em solos agrícolas, são focados no reaproveitamento dos resíduos como subprodutos e estão alinhados com os CS 2, 4, 6, 9, 12, 13 e 17.

Os fatores O5 e O6, que são referentes à aceitação de combinações com outros resíduos, o que pode transformar a DA em codigestão anaeróbia; e os incentivos da legislação internacional, que pode influenciar a legislação local, respectivamente. A aceitação da DA para tratamento de outros resíduos conjuntamente, ou seja, a codigestão, mostra todos os benefícios e dificuldades da digestão comum, porém ainda pode interferir com a diminuição das fraquezas

e ameaças. Por exemplo, a mistura de dois ou mais resíduos, quando bem executada quanto suas composições químicas e biodegradabilidade, pode melhorar as características do produto final, mesmo que um deles tenha baixa biodegradabilidade. E ainda pode diminuir etapas, já que resíduos que teriam tratamentos por rotas diferentes são tratados pela mesma rota (CS 8), trazendo economia de escala, pessoal, custos (C6) e, em alguns casos, promovendo maior eficiência do tratamento (CS 4). A codigestão pode ser encarada como uma otimização da digestão e está sendo cada vez mais utilizada em todo o mundo (SILVEIRA, 2016).

Ambas as oportunidades (O5 e O6) foram consideradas como de média importância e indicam uma tendência de crescimento no Brasil. Países na Europa e EUA já utilizam a DA para o tratamento de seus resíduos, com legislação dedicada e incentivos governamentais, pois é reconhecida pela comunidade internacional como mais sustentável ao comparar com as tecnologias usadas atualmente, que se mostram cada vez mais insustentáveis (CS 2, 12 e 14) (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014). Historicamente, países emergentes e em desenvolvimento copiam os avanços tecnológicos e ambientais de países desenvolvidos. Portanto, espera-se que o Brasil amplie o uso de DA no tratamento de resíduos sólidos e não apenas em projetos independentes, como ocorre atualmente.

E ainda, uma outra oportunidade está relacionada às instalações de DA, que são diferentes dos incineradores, que geram muitas emissões atmosféricas, e os aterros, que necessitam de muito espaço. Uma unidade que realizará a DA pode ser localizada geograficamente em qualquer lugar, não enfrentando problemas quanto à localização (O7), pois impacta pouco nas suas proximidades, não interfere diretamente no solo e não ocupa muito espaço. Na maioria das instalações operacionalmente estáveis não traz prejuízos à população próxima aos digestores, estando de acordo com os CS 12 e 16. O único ponto de atenção, que não pode ser considerado como negativo, está relacionado ao clima e será mais detalhado na sessão de ameaças.

A Figura 19 mostra os resultados de valoração de importância para as ameaças dos aspectos apontados na matriz SWOT. O risco de vazamentos e explosões (T4), embora pouco prováveis de acontecer se todos os aspectos de segurança sejam bem executados (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014) e recomendados pelo CS 7, foi considerado no nível maior, totalmente importante. É uma ameaça que põe em risco as vidas humanas, esbarrando na responsabilidade social, na prevenção de acidentes e no uso de substâncias perigosas (que inclui os produtos gerados), CS 12, 7 e 1, respectivamente. E ainda contribui para o aumento do efeito

estufa, o que se tornou também um ponto de atenção no transporte e operações envolvendo biogás, trazendo uma ameaça ambiental.

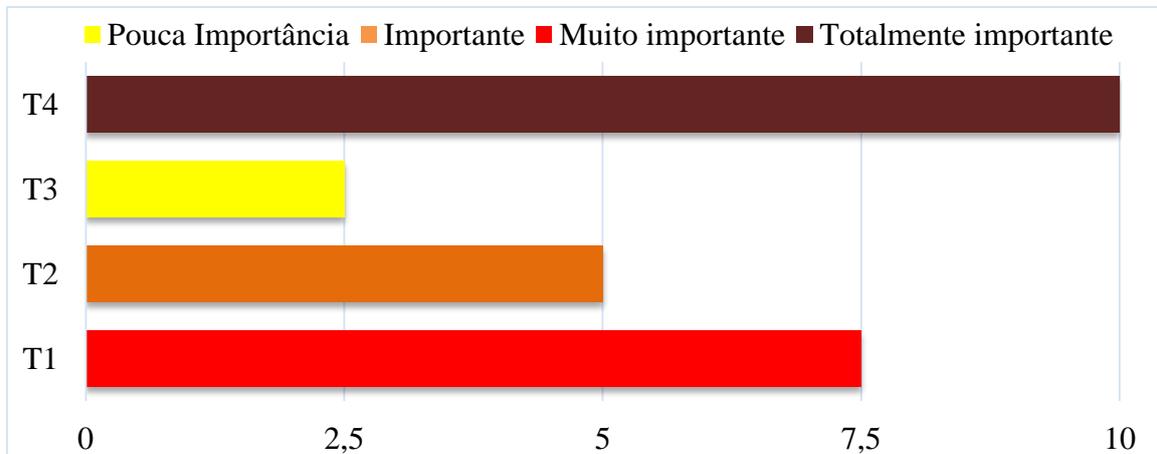


Figura 19- Valorações de importância das Ameaças da tecnologia de digestão na análise SWOT. T1= Tipo de material, T2= Condições climáticas, T3= Legislação específica e T4= Vazamentos e explosões

Considerado como muito importante, também se tem a alta dependência do tipo de entrada do material (T1), que é uma limitação de caráter técnico e operacional do processo estudado. Em geral, mesmo mantendo-se um mesmo tipo de resíduo na entrada ou alimentação do digestor, ocorrem variações na sua composição. Em alguns casos, a composição do resíduo se torna inviável para a digestão (CS 17) ou leva à formação de compostos que dificultam a digestão (CS 6), inviabilizando o tratamento.

Outra ameaça que deve ser considerada é a limitação do processo pelas condições climáticas (T2). É uma ameaça considerada importante, porém em nível mediano. Apesar de poder, em alguns casos, inviabilizar economicamente se realizada em locais de baixa temperatura ambiente ( $< 20^{\circ}\text{C}$ ) (ADAR, 2016; AICH e GHOSH, 2016), pois utilizaria muita energia para o aquecimento. Este fator pode ser minimizado com a escolha do local de construção em regiões de clima temperado em uma das primeiras fases de qualquer projeto a partir de um estudo integrado (CS 13) e observando a regionalização para o processo (CS 10). Como a DA é uma tecnologia madura (CS 16), é sabido que locais de altas temperaturas promovem maior eficiência e menor consumo de energia para aquecimento (CS 6) o que torna o processo mais sustentável.

A ameaça T3 foi considerada pouco importante, pois se trata de um cenário indefinido e tem muito a ver com a política do país. Apesar da PNRS, que estimula efetuar o tratamento de resíduos, hoje ainda não há uma regulamentação específica que contemple o tratamento dos

resíduos industriais via DA (definindo condições, incentivos e/ou restrições do uso). Se surgir pode ser restritiva e dificultar a promoção da DA ou pode ser vista como ameaça por não haver incentivos/investimentos de larga escala do setor público para uma tecnologia que se mostra tão promissora para tratamento de resíduos e aproveitamento energético, isto é, favorecendo a sustentabilidade e indo ao encontro dos CS 2, 6, 12, 14, 15 e 17, principalmente.

Posteriormente, foram somados os valores obtidos em cada fator, seguindo seu nível de importância e mostrados na Tabela 13. Verifica-se pela análise da Matriz SWOT que a tecnologia de digestão anaeróbia para lodo de refinaria apresenta maior valoração dos elementos de pontos positivos, forças e oportunidades. Indicando, já à primeira vista, que se trata de uma técnica vantajosa.

Tabela 13- Somatório da valoração dos elementos e % na matriz SWOT sobre a digestão anaeróbia para lodos de refinaria.

Elementos	Valoração	%
Forças	52,5	34,4
Fraquezas	27,5	18,0
Oportunidades	47,5	31,1
Ameaças	25,0	16,4

Outra forma de medir quantitativamente a quão vantajosa pode ser uma tecnologia é calcular o chamado Índice de Favorabilidade (IF), isto é, o quão o cenário atual é favorável para utilizar esta tecnologia. Utilizando-se a Equação 1 e os resultados da Tabela 13, chega-se ao valor de Favorabilidade de 62,2%, que indica que o ambiente em que o objeto estudado está inserido é favorável ao desenvolvimento, pois está acima de 30%, recomendando-se o uso desta técnica. Os resultados obtidos com este índice demonstram que a DA possui Forças que lhe permitem reduzir as Fraquezas, evitando as Ameaças e aproveitando as Oportunidades.

Ao apresentar a matriz SWOT da digestão anaeróbia, foi possível, inicialmente, a identificação dos ativos e passivos competitivos externos e internos do objeto estudado (PORTER, 1986). E a análise mais aprofundada deles, após a valoração, de acordo com critérios de sustentabilidade, sendo possível determinar a fase, ou seja, buscar entender o status atual da técnica frente ao universo e ao momento que está inserido (desenvolvimento, manutenção, crescimento e sobrevivência). Para isso, uma das principais formas para esta determinação é realizar o cruzamento de dados entre importância e fatores identificados, a chamada valoração cruzada (BORGES, 2013; DUTRA, 2014; LUZ, 2013; QUALHARINI, 2014; RODRIGUES et al., 2016).

O cruzamento dos dados é umas mais importantes etapas da análise SWOT, que além de indicar a fase, neste momento é possível traçar planos para potencializar o que tem de melhor e se preparar para possíveis problemas. Aplicada a gestão de empresas, onde é mais usada esta técnica, refere-se a mudar seu sistema de gestão para diminuir pontos negativos e aproveitar os positivos (BORGES, 2013). No estudo da SWOT para um processo definido há uma limitação de não possibilidade de mudança de cenário, pois trata-se de uma técnica consolidada que não permite um movimento de melhoria contínua a ser considerado, como em uma empresa, por exemplo. Foi observado que quando se trabalha com características, ou seja, particularidades intrínsecas ao sistema imutável, é mais difícil ou não se aplica montar um plano de ação para melhoria daquele cenário. Apenas é possível observar e analisar o cenário já definido.

Sendo assim, para o enquadramento do presente estudo, considerou-se a valoração dos fatores obtidos como o somatório das pontuações obtidas na etapa anterior, demonstrados na Tabela 13, para cada elemento-par SWOT: S-O; S-T; W-O; W-T, que formam, respectivamente, os quadrantes I, II, III e IV (Figura 20).

		<i>Ambiente externo</i>	
		Oportunidades	Ameaças
<i>Ambiente interno</i>	Forças	<b>I</b> $(52,5+47,5)= 100,0$ <b>DESENVOLVIMENTO</b>	<b>II</b> $(52,5+ 25)= 77,5$ <b>MANUTENÇÃO</b>
	Fraquezas	<b>III</b> $(47,5+ 27,5)= 75,0$ <b>CRESCIMENTO</b>	<b>IV</b> $(27,5+ 25)=52,5$ <b>SOBREVIVÊNCIA</b>

Figura 20- Resultado do cruzamento de fatores da matriz SWOT.

Para entender a importância da identificação da fase do objeto estudado em seu universo, esta análise foi definida como um estudo da relação entre ambiente interno e externo presentes na análise SWOT, que fornece um demonstrativo dos níveis de qualificação dos processos (fazendo um paralelo das referências originais que dão o nível de qualificação das empresas e

organizações) e apresentando o seu índice de competitividade no mercado (ANDRADE et al., 2008).

Aplicando esta metodologia, nota-se que a Digestão Anaeróbia para tratar os resíduos estaria no quadrante I – desenvolvimento - atingindo 100,0 pontos (Figura 20), isto é, majoritariamente tem forças e oportunidades. E, então, define-se como de potencialidade da ação ofensiva. A principal característica é o aproveitamento das oportunidades através dos pontos fortes, ou seja, as forças podem ajudar a aproveitar as oportunidades do mercado, correspondendo a uma técnica de tratamento desenvolvida e indicada para os resíduos do ponto de vista sustentável, quando comparados, por exemplo, às técnicas que são usadas atualmente para tratamento e destinação como incineração e aterros, ambas com vertentes importantes que estão em desacordo com os princípios da sustentabilidade, o que faz da DA uma importante alternativa para os resíduos.

A eficácia desta representação por meio do cruzamento e somatório, que tem por premissa o aproveitamento de um elemento para dirimir problemas do outro, como uma anulação de pontos negativos através de pontos positivos, ou potencializar melhorias através da soma de fatores positivos, pode ser exemplificada em todos os quadrantes. Exemplos:

- Quadrante I – FORÇAS X OPORTUNIDADES: “*Como a oportunidade pode potencializar a força?*” Exemplo: S6 (Ocupa pequenas áreas) + O6 (Incentivos da legislação).

O aumento da pressão da população contra o uso de grandes áreas para destinação de resíduos pode conduzir ao aumento do número de leis voltadas ao assunto. O uso de áreas muito grandes para tratamento de resíduos necessita de alteração de topografia, monitoramento das águas superficiais e do entorno por anos, como nos aterros (CETESB, 1977). Desta forma, esta pressão do ambiente externo, a oportunidade, contribui com a potencialização da força que é não ocupar grandes áreas e todo o seu desencadeamento de impactos.

- Quadrante II – FORÇAS X AMEAÇAS: “*Como minimizar sua ameaça com sua força?*”. Exemplo: S2 (Tecnologia Madura) + T4 (Riscos de explosão e incêndios).

Por se tratar de um processo com produção de biogás – composto majoritariamente de metano (CH<sub>4</sub>) - é possível que ocorram vazamentos de gás nas linhas e, conseqüentemente, explosões mediante qualquer fonte de ignição externa. No entanto, por ser uma tecnologia bastante conhecida é considerada por engenheiros sanitaristas a principal rota de tratamento para estabilização de lodos domésticos desde o final do século 19. Sendo assim, estes riscos, a ameaça, e como conte-los, já foram bastante estudados e desenvolvida a *expertise* para evitar

tais problemas, como o uso de exaustores dentre outras medidas de segurança protocolares. (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014).

- Quadrante III – FRAQUEZAS X OPORTUNIDADES: “*Como diminuir sua fraqueza com as oportunidades?*” Exemplo: W1 (Necessidade de pós-tratamento) + O4 (Redução de massa e volume acarretando redução dos custos posteriores).

Uma fraqueza do processo é que em muitos casos é necessário algum pós- tratamento antes da disposição final, para adequar as leis vigentes, ainda que o resíduo tenha sido estabilizado e diminuído seu caráter poluidor (METCALF e EDDY, 2014). Mas, uma oportunidade que pode diminuir esta fraqueza é que durante o processo, a massa e o volume final se tornam menores que os iniciais e há um menor custo, em termos de quantidade, para aplicação do pós-tratamento.

- Quadrante IV – FRAQUEZAS X AMEAÇAS: “*Como diminuir sua perda?*” Exemplo: W3 (Aquecimento Inicial) + T2 (Limitado pelas condições climáticas).

No ato da partida do digestor há um *input* de energia muito maior do que é utilizado durante a operação. Isto se deve ao aquecimento para a temperatura necessária às reações químicas importantes na digestão anaeróbia (ADAR et al., 2016; FOLADORI; ANDREOTTOLA; ZIGLIO, 2010), o que é uma fraqueza. Além disto, um ponto a ser observado é a região onde deve ser localizado o digestor, condições climáticas com temperaturas naturalmente altas devem ser preferidas de forma a diminuir o gasto com aquecimento.

Usualmente estas análises, após a construção da matriz SWOT, são utilizadas de maneira mais simples para empresas, mas pode-se ver que é possível aplicar este tipo de planejamento estratégico para os esforços ambientais a fim de entender cada vez mais o sistema sob a ótica de um planejamento estratégico da gestão ambiental.

## **4.2. Avaliação experimental**

### **4.2.1. Caracterização do lodo de refinaria**

Na Tabela 14 são apresentados os valores obtidos na caracterização do lodo gerado na planta de lodos ativados de uma refinaria brasileira, após etapa de desaguamento por centrifugação. As análises físico-químicas realizadas foram selecionadas principalmente para a identificação de características importantes para a viabilidade do tratamento e disposição deste tipo de resíduo.

Tabela 14- Caracterização físico-química do lodo secundário de refinaria.

Parâmetro	Unidade	Valor
pH	--	7,13 ± 0,02
Umidade	%	85,3 ± 0,07
Densidade	g/mL	0,996 ± 0,00
Sólidos Totais	g/100 g massa úmida	13,8 ± 0,04
Sólidos Totais Voláteis	g/100 g massa úmida	8,4 ± 0,05
Sólidos Totais Fixos	g/100 g massa úmida	5,4 ± 0,01
Óleos e Graxas	g/100 g massa seca	0,2 ± 0,01
Hidrocarbonetos	g/100 g massa seca	0,1 ± 0,01
Carbono	g/100 g massa seca	38,4 ± 0,35
Nitrogênio	g/100 g massa seca	5,2 ± 0,21
Fósforo Total	g/100 g massa seca	1,7 ± 0,00
Cádmio	mg/100 g massa seca	< 0,07 <sup>a</sup>
Chumbo	mg/100 g massa seca	0,7 <sup>a</sup>
Cobre	mg/100 g massa seca	0,7 <sup>a</sup>
Cromo	mg/100 g massa seca	0,4 <sup>a</sup>
Ferro	mg/100 g massa seca	475,1 <sup>a</sup>
Manganês	mg/100 g massa seca	12,0 <sup>a</sup>
Níquel	mg/100 g massa seca	0,8 <sup>a</sup>
Zinco	mg/100 g massa seca	34,7 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Ensaios realizados por laboratório contratado, não foi fornecido o erro da análise.

Os dados obtidos nesta caracterização apresentam similaridade com os encontrados na literatura para lodos provenientes da fase secundária do tratamento de efluentes de refinarias de petróleo, do tipo lodos ativados por aeração prolongada.

O lodo de refinaria apresenta pH neutro, alta umidade (mesmo após a etapa de centrifugação) e consistência pastosa, ainda sendo considerado um lodo fluido (VAN HAANDEL e LETTINGA, 1994 *apud* ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014). Metcalf e Eddy (2014) citam valores de 80 a 85% para umidade ou 15 a 20% para sólidos totais (ST) em lodos de esgoto desaguados. Os valores de ST apresentados são similares aos obtidos por Alexandre (2013), que em seu estudo obteve 10,1% de ST para um lodo de refinaria centrifugado.

Cerca de 65% dos sólidos totais são voláteis, indicando um elevado conteúdo de matéria orgânica no lodo. Na literatura encontram-se valores percentuais de SV maiores. No entanto, como o processo no qual o resíduo foi originado é um lodo ativado de aeração prolongada, parte da matéria orgânica do lodo sofre estabilização no próprio processo, reduzindo os SV para

valores menores do que os usuais 75-80% para lodos não digeridos (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014).

Além dos parâmetros citados, observa-se que o lodo apresenta baixo conteúdo de óleos e graxas e hidrocarbonetos. Provavelmente, a segregação das correntes de efluentes e seus pré-tratamentos, assim como uma eficiente etapa de tratamento primário, impediram a entrada de altas concentrações destes constituintes no tratamento secundário. O LR apresenta altos teores de carbono (outra forma de quantificar matéria orgânica) e nitrogênio, o que resulta em uma baixa razão C/N (7,4) para a digestão anaeróbia, considerando a razão ideal de 20 a 30 proposta por Chernicharo (2007). Já o fósforo, que é também um nutriente importante, é usualmente encontrado entre 1 e 2% nos lodos de esgotos. Logo, o LR com 1,7% contém fósforo suficiente para a DA (MEFCALF e EDDY, 2014).

Por se tratar de um lodo que entrou em contato com efluente industrial, também foram quantificados os principais metais encontrados usualmente no petróleo (THOMAS, 2004). Metais podem ser limitantes para a disposição final do resíduo como, por exemplo, condicionante de solo na agricultura, sendo em alguns países considerado o risco ambiental associado a este uso (ALEXANDRE, 2018; KACPRZAK et al., 2017). Observam-se concentrações pequenas para a maioria dos metais, e maiores concentrações somente para ferro, manganês e zinco. Não foram encontrados outros trabalhos que avaliam os metais em lodos secundários do tratamento de efluentes de refinaria de petróleo, apenas em óleo cru, para comparação com os valores obtidos neste estudo. Lodos de esgotos, comumente usados como referência neste trabalho, usualmente não possuem metais.

#### 4.2.2. Caracterização do Inóculo

A caracterização físico-química simplificada do lodo anaeróbio utilizado como inóculo em todas as etapas experimentais é apresentada na Tabela 15.

Tabela 15- Caracterização do lodo anaeróbio empregado como inóculo nos ensaios de digestão anaeróbia

Parâmetro	Unidade	Valor
pH	--	6,81 ± 0,11
Umidade	%	95,7 ± 0,01
Densidade	g/mL	1,01 ± 0,00
Sólidos Totais	g/100g de massa úmida	4,1 ± 0,01
Sólidos Voláteis	g/100g de massa úmida	2,4 ± 0,01
Sólidos Fixos	g/100g de massa úmida	1,7 ± 0,02

### 4.2.3. Digestão anaeróbia de lodo de refinaria – Experimental

A produção de biogás do experimento conduzido na Etapa 1 foi monitorada ao longo de 45 dias, como apresentado na Figura 21. Ao final deste período, foi observado que a maior produção de biogás (194,5 mL) se deu na condição 1 (lodo de refinaria, sem adição de inóculo), seguida da condição 5 (lodo de refinaria com I/S 1 - 135 mL). Aparentemente, a adição de inóculo não favoreceu a estabilização do lodo de refinaria, como esperado, pois sua adição reduziu o volume de biogás produzido. No entanto, deve-se considerar que inóculo e lodo de refinaria apresentam concentrações de sólidos voláteis bem diferentes, alterando a carga de SV aplicada e, portanto, o volume de biogás.

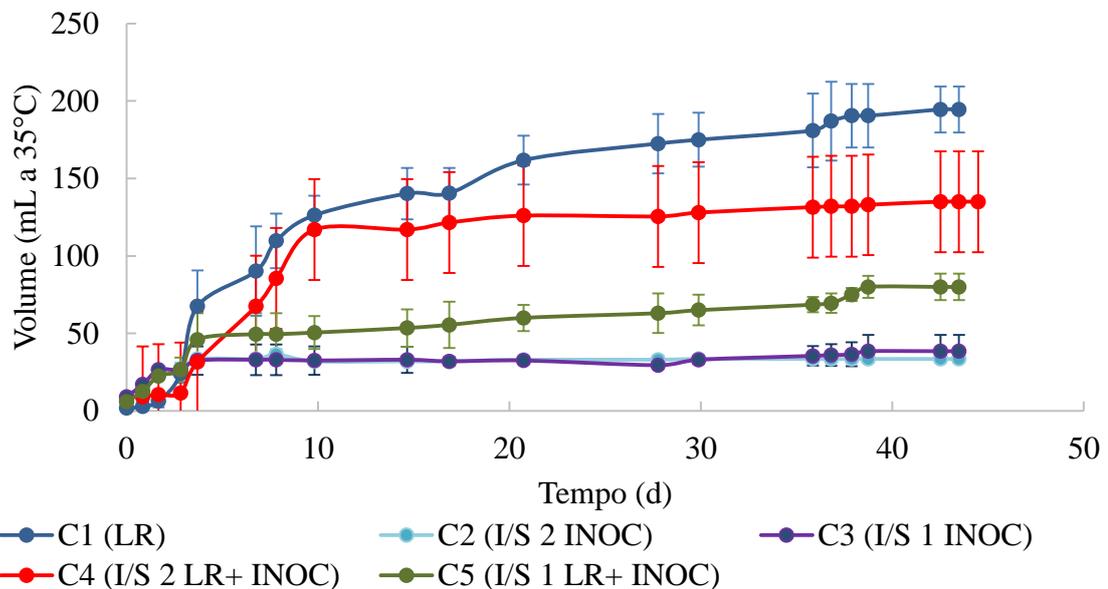


Figura 21-Volume de biogás (35°C, 1 atm) acumulado nos ensaios de digestão anaeróbia com diferentes conteúdos de lodo de refinaria e inóculo (Etapa 1).

Assim, deve-se avaliar a eficiência da digestão anaeróbia pela produção específica de biogás (PEB), que considera o volume de gás produzido em função da quantidade de matéria orgânica aplicada, medida em SV (Tabela 16).

Tabela 16- Resultados dos ensaios de digestão anaeróbia conduzidos na Etapa 1

Condição	Volume Biogás (mL)	pH final	SV aplic. (g)	SV final (g)	Remoção SV (%)	PEB (mL biogás/g SV aplic.)
C1 LR	194,5±14,8	8,30	7,6	7,0±0,23	6,89±3,04	25,73±1,96
C2 Controle I/S 2	33,5±2,1	8,20	2,3	1,7±0,03	26,14±1,31	14,6±0,92
C3 Controle I/S 1	38,5±10,6	8,17	3,0	1,7±0,07	42,12±2,40	13,20±3,64
C4 LR + I (I/S 2)	80,0±8,5	8,10	3,0	2,6±0,03	14,42±1,00	26,67±2,83
C5 LR + I (I/S 1)	135,0±32,5	8,08	4,2	3,7±0,04	12,42±0,95	32,11±7,74

Volume de biogás a 35°C e 1 atm.

Considerando a PEB média de cada condição, maiores valores foram obtidos nas condições 4 e 5, com adição de inóculo, em comparação às condições C2 e C3, sem inóculo. Este resultado está de acordo com o esperado, pois na composição do LR podem ser encontradas substâncias inibidoras de atividade microbiana, reduzindo o número de microrganismos viáveis. A adição de inóculo tem como finalidade aumentar o número de microrganismos ativos e acelerar a estabilização do lodo de refinaria (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; VON SPERLING, 2002).

Porém, é importante observar que nas condições 4 e 5 nem todo o volume de gás obtido é formado a partir do lodo de refinaria, sendo parte devido ao inóculo. Para considerar este volume a mais, foram realizados experimentos na condição controle de inóculo (condições 2 e 3). Sendo assim, descontando os volumes dos controles de inóculo dos volumes finais obtidos (C2- 33,5 mL e C3- 38,5mL), obtêm-se 46,5 e 96,5 mL de biogás e uma PEB de 45,45 e 46,71 mL biogás/g SV (do LR) aplicados para as condições 4 e 5, respectivamente. Portanto, a adição de inóculo contribuiu para uma produção específica de biogás 76,6 e 81,5% maior em comparação com a condição C1. Dada a proximidade de valores e os desvios-padrão obtidos, não é possível afirmar quais das condições com adição de inóculo seria melhor.

A fim de verificar se realmente ocorreu a estabilização do LR, a composição do biogás em termos de metano (CH<sub>4</sub>), produto final do metabolismo, deveria ser considerada. No entanto, devido a problemas com o CG do laboratório, a análise da composição do biogás foi realizada cerca de 9 meses após a coleta e armazenamento do biogás em ampolas gasométricas,

comprometendo os resultados da mesma. Assim, parte do gás foi perdida e altos índices de O<sub>2</sub> foram detectados nas amostras, sendo os resultados desconsiderados.

Outra forma de avaliar a estabilização do LR é pela remoção de SV, pois a digestão reduz a concentração de matéria orgânica. No entanto, a remoção obtida foi baixa para o lodo de refinaria puro (somente 6,9%). Este resultado pode ter ocorrido em função da elevada concentração de SV aplicada e as características específicas do lodo de refinaria, comparadas com a de lodos de esgoto, por exemplo, contribuindo para remoções mais baixas. Já para o inóculo, as remoções de SV (26 a 42%) foram mais próximas de valores normalmente encontrados para lodos de esgoto, em torno de 50-60% (METCALF e EDDY, 2014). Pode-se concluir que a adição de inóculo também melhora a remoção de SV, em relação ao lodo de refinaria puro, no entanto as porcentagens de remoção foram baixas.

Nos experimentos da Etapa 1 não foi possível realizar o ajuste do pH inicial nos frascos devido à consistência pastosa do LR *in natura*, ficando o pH inicial maior que o ideal, em torno de 7 (CHERNICHARO, 2007). Ao final dos experimentos, o pH se situou entre 8,1 e 8,3. A análise da concentração de AGV também não foi realizada devido à consistência das amostras.

Segundo Silva (2001), quando se busca uma produtividade máxima de biogás (volume de biogás por volume de biodigestor e unidade de tempo), a concentração de Sólidos Totais (ST) máxima na amostra submetida à digestão deve ser menor que 8%, o que também facilita o movimento do material no interior do biodigestor, além de evitar entupimentos nas tubulações do biodigestor. Quando as concentrações de ST são maiores que 10%, observam-se a diminuição da eficiência do biodigestor e o aumento da formação de incrustações, isto é, sólidos que se agrupam e aderem à superfície e laterais dos biodigestores. Nos experimentos da Etapa 1 foram utilizados cerca de 13% de ST nos frascos onde ocorreu a digestão. E este pode ter sido o motivo de diversos entupimentos e dificuldades na operação dos frascos nesta etapa.

Os experimentos de digestão anaeróbia da Etapa 2, conduzidos nas mesmas condições da etapa anterior, mas agora com menores concentrações iniciais de LR para minimizar os problemas da etapa anterior, também foram monitorados ao longo de 45 dias. A Figura 22 apresenta a evolução da produção acumulada de biogás durante este período. Ao final do experimento, os frascos controle (contendo somente inóculo) apresentaram os menores valores de volume de biogás: 1,5 mL (controle I/S 1) e 18,7 mL (controle I/S 2), conforme esperado, pois ambas as condições continham as menores massas iniciais de sólidos voláteis. No entanto, não se verificou uma correlação entre massa inicial de sólidos voláteis e produção de biogás.

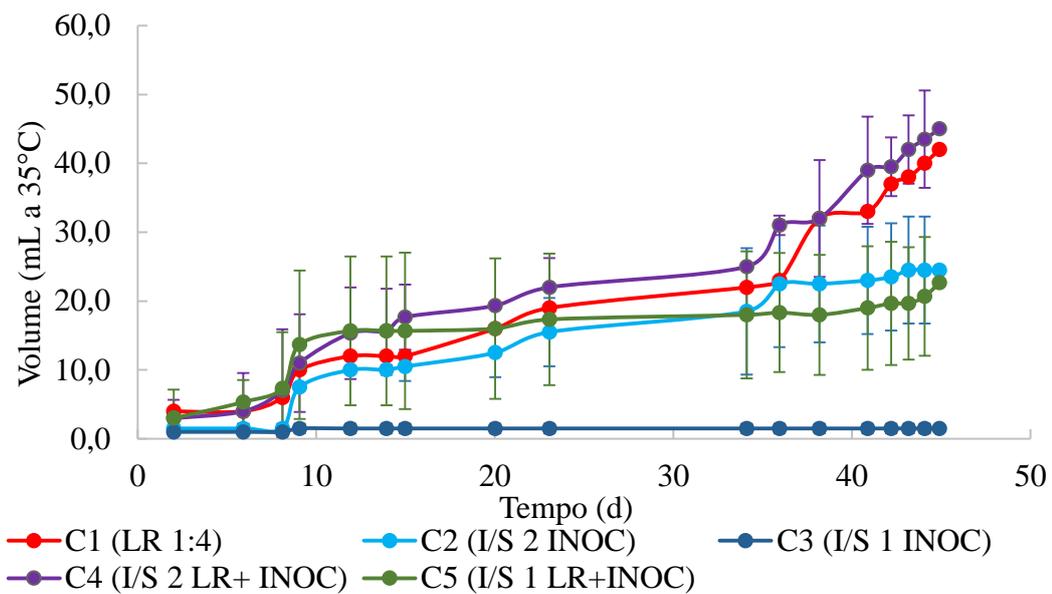


Figura 22- Volume de biogás (35°C, 1 atm) acumulado nos ensaios de digestão anaeróbia com diferentes conteúdos de lodo de refinaria diluído e inóculo (Etapa 2).

Uma comparação entre as condições com lodo de refinaria (LR) e inóculo (C5 e C4) e os respectivos controles (somente inóculo – C3 e C2), para cada razão I/S avaliada, mostra que na condição com LR ocorreu maior produção de biogás nas duas razões I/S. Na razão I/S 1 o volume de biogás final aumentou de 1,5 para 22,7 mL, ou seja, ocorreu uma produção de biogás de 21,2 mL a partir do LR. Enquanto na razão I/S 2, o volume de biogás aumentou de 18,7 para 45,0 mL, ou seja, ocorreu uma produção de 26,3 mL de biogás a partir do LR.

O resultado verificado na comparação das condições com LR e inóculo e seus respectivos controles se deve a uma maior massa inicial de sólidos voláteis empregada com a adição de LR e à sua biodegradabilidade. Portanto, pode-se concluir que o LR apresenta algum grau de biodegradabilidade, primeiro requisito a ser considerado para o tratamento por digestão anaeróbia.

Outra comparação pode ser feita entre as condições com LR e inóculo nas razões I/S 1 (C5) e I/S 2 (C4), nas quais se verificou que a produção de biogás praticamente dobrou, aumentando de 22,7 para 45 mL ao se aumentar a razão I/S de 1 para 2, respectivamente. Este resultado já indica que ajustes das condições ambientais podem aumentar o rendimento de biogás e, provavelmente, de metano. Diferente do que ocorreu na etapa 1, na qual melhores resultados de biogás se deram tanto com I/S 1 como com I/S 2, considerando o desvio padrão. Em relação

à remoção de SV, as condições I/S 1 e I/S 2 ficaram muito próximas nas etapas 1 e 2. Com o ajuste de ST inicial, em termos de biogás, os resultados foram melhores com I/S 2.

Uma última comparação foi feita entre a condição com LR somente (C1) e a melhor condição de LR e inóculo (I/S 2, C4). Apesar da curva de produção de biogás da condição com inóculo se situar sempre acima da curva obtida com LR somente, ao se considerar os desvios padrões de ambas as condições (valores de DP de 0,7 a 8,6% foram observados em todas as condições estudadas), pode-se estimar que praticamente não há diferença entre estas duas condições. Tal resultado indica que, embora o controle I/S 2 tenha apresentado melhor resultado que o controle I/S 1, no LR diluído para uma concentração/umidade mais próxima à do lodo secundário descartado no sistema de lodos ativados da refinaria estão presentes microrganismos anaeróbios que iniciam o processo de degradação, não sendo necessária a adição de inóculo contendo tais microrganismos. No entanto, mais estudos são necessários para confirmar a necessidade ou não de inóculo e que efeitos esta adição teria na cinética de degradação do LR. Outra observação diferente da etapa 1, com maior concentração de substrato, é que todas as condições da etapa 2 apresentaram a mesma duração de fase *lag*, só sendo observada a produção de biogás após cerca de 5 dias de incubação.

A redução de sólidos voláteis, a produção específica de biogás (PEB) e outros parâmetros monitorados na digestão anaeróbia das diferentes condições estudadas são apresentados na Tabela 17.

Tabela 17- Resultados dos ensaios de digestão anaeróbia conduzidos na Etapa 2.

Condição	Volume Biogás (mL)	pH final	AGV/ Alc.	SV aplic. (g)	SV final (g)	Remoção SV (%)	PEB (mL biogás/g SV aplic.)
C1 - LR	42,0±0,0	6,72±0,23	0,51	1,1	0,9±0,03	18,67±3,00	38,47±0,0
C2 - Controle I/S 2	18,7±11,5	6,87±0,07	0,39	0,8	0,7±0,01	15,55±1,56	31,93±14,99
C3 - Controle I/S 1	1,5±0,7	6,71±0,03	0,39	0,6	0,5±0,02	18,70±3,20	2,30±1,09
C4 - LR + I (I/S 2)	45,0±7,1	7,18±0,02	0,30	1,2	1,0±0,01	17,99±0,65	38,76±6,12
C5 - LR + I (I/S 1)	22,7±8,6	6,97±0,04	0,24	1,1	1,0 ±0,05	16,40±4,11	19,82±7,52

Volume de biogás a 35°C e 1 atm.

Seguindo a mesma ordem de comparação adotada para a produção de biogás, verifica-se que os frascos controle (contendo somente lodo anaeróbio empregado como inóculo) apresentaram os menores valores de remoção de sólidos voláteis (SV): 18,7% (no controle I/S 1) e 15,6% (no controle I/S 2). A remoção de SV no controle I/S 1 é muito maior do que poderia ser obtida de acordo com o volume de biogás medido (apenas 1,5 mL), indicando que provavelmente houve vazamento do biogás produzido. Com relação à remoção de SV, pode-se dizer que a massa de inóculo afeta muito pouco.

Uma comparação da remoção de SV entre as condições com LR e inóculo nas razões I/S 1 (C5) e I/S 2 (C4) revela que, novamente, foram obtidos resultados similares. A condição com LR somente apresentou melhor resultado, com a maior remoção de SV (18,7%). No entanto, o valor obtido é próximo à condição com LR I/S 2 (C4 – 18,0%) e LR I/S 1 (C5- 16,4%), ambos condizentes com a produção de biogás observada.

Apesar de compatíveis com os volumes de biogás produzido, as remoções de SV ainda permaneceram baixas para o LR diluído, em comparação com valores obtidos para lodo de esgoto, que geralmente variam entre 50 e 65% em digestores de alta taxa (METCALF e EDDY, 2014). Apesar da digestão anaeróbia ter sido conduzida em condições ainda não otimizadas, tal resultado confirma o efeito da composição mais complexa e de concentrações residuais de hidrocarbonetos e metais no lodo de refinaria sobre a digestão anaeróbia do mesmo, tal como comentado no item 4.2.1.

Com relação à PEB (mL biogás/g SV aplicados), a mesma comparação com o volume de biogás produzido se repete, com as condições com LR e inóculo e razão I/S 2 e somente lodo de refinaria com valores maiores e praticamente iguais (Tabela 17). À exceção da condição C3 (controle I/S 1), na qual pode ter havido vazamento de biogás, levando a um valor de PEB muito baixo, todas as demais apresentam valores compatíveis com a remoção de SV. No entanto, ainda são valores muito baixos, em comparação com valores obtidos na digestão de lodo de esgoto. Por exemplo, Nielfa; Cano; Fdz-Polanco (2015) obtiveram 263 mL de biogás/g SV aplicados com lodo biológico de estação de tratamento utilizando a metodologia BMP.

O pH, ajustado para  $7,0 \pm 0,2$  no início, se manteve ao final do experimento, apresentando valores de 7,0-7,1. Neste experimento, avaliou-se também a concentração de ácidos graxos voláteis, que diminuiu em todas as condições, mantendo a razão AGV/Alcalinidade (AGV/Alc) em valores adequados à digestão anaeróbia, próximos ou menores que 0,5 (CHERNICHARO, 2007).

#### 4.2.4. Caracterização do resíduo alimentar

O resíduo alimentar (RA) obtido a partir de restos de alimentos domiciliares foi primeiramente segregado, a fim de se obter a porcentagem aproximada de cada alimento na sua composição. Na Tabela 18 são apresentados os percentuais (m/m) dos alimentos segregados. A maior parte (44,4%) dos alimentos utilizados foram frutas, seguidas dos tubérculos (32,5%) e raízes (14,1%).

Tabela 18- Percentual de diferentes componentes do Resíduo Alimentar

Alimento	Massa (g)	% (m/m)
<i>Frutas</i>		
Laranja/ Tangerina	377,36	9,8
Banana	299,95	7,8
Abacaxi	229,24	5,9
Mamão	149,30	3,9
Manga	173,49	4,5
Tomate	147,54	3,8
Berinjela	127,61	3,3
Uva	85,27	2,2
Abobrinha	81,95	2,1
Maça	42,60	1,1
<i>Tubérculos</i>		
Batata inglesa	816,73	21,1
Batata doce	439,65	11,4
<i>Raízes</i>		
Cenoura	265,67	6,9
Aipim	126,41	3,3
Beterraba	85,08	2,2
Cebola	65,01	1,7
Alho	3,30	0,1
<i>Legumes e Verduras</i>		
Alface	141,76	3,7
Chuchu	34,43	0,9
<i>Outros</i>		
Não identificados	172,11	4,5

No preparo do RA, adicionou-se água para facilitar a trituração dos alimentos, levando a uma alteração da umidade natural. Este aumento, porém, contribui para o processo de decomposição dos resíduos sólidos, uma vez que os microrganismos dependem de um meio aquoso para a solubilização dos substratos e nutrientes requeridos para seu crescimento (GADELHA, 2005).

O resíduo alimentar apresenta percentuais de carboidratos e proteínas de 14,5% e 0,19%, respectivamente, e muito pouco óleos e graxas (0,02%). Pode-se atribuir a baixa concentração de O&G à composição dos alimentos que formam o RA deste estudo, alimentos naturais, não processados ou cozidos e, em sua maioria, cascas. Após trituração, obteve-se o RA cuja caracterização físico-química está apresentada na Tabela 19.

Tabela 19- Caracterização físico-química do resíduo alimentar

Parâmetro	Unidade	Valor
pH	--	4,38 ± 0,16
Umidade	%	90,30 ± 0,92
Densidade	g/mL	1,05 ± 0,00
Sólidos Totais	g/100 g massa úmida	10,10 ± 0,18
Sólidos Voláteis	g/100 g massa úmida	9,30 ± 0,17
Sólidos Fixos	g/100 g massa úmida	0,70 ± 0,02
Carbono	g/100 g massa seca	44,31 ± 0,00
Nitrogênio	g/100 g massa seca	8,10 ± 0,00
Fósforo	g/100 g massa seca	0,14 ± 0,00
Óleos e Graxas	g/100 g massa seca	0,02 ± 0,01
Carboidratos	g/100 g massa seca	14,49 ± 0,00
Proteínas	g/100 g massa seca	0,19 ± 0,00

A baixa razão C/N (5,5) indica uma alta concentração de nitrogênio no RA, como observado para o LR. Uma maior concentração de nitrogênio no RA seria um dos motivos para sua aplicação na codigestão com LR. Como o RA obtido era formado em grande parte por alimentos com alto teor de carboidratos e, conseqüentemente, alto teor de carbono, como batata, esperava-se uma maior concentração de carbono, em relação ao nitrogênio, na mistura de resíduos a fim de ajustar a razão C/N para o valor ideal de 20 a 30 (CHERNICHARO, 2007), o que não ocorreu. No RA a razão C/N foi ainda menor que no LR, contribuindo com mais nitrogênio na mistura. No entanto, a concentração de nitrogênio obtida está de acordo com dados da literatura (LIU et al., 2012; KIM et al., 2006), que apresenta valores de nitrogênio em resíduos alimentares entre 2,5 e 13%. Picanço (2004) relata que quando a razão C/N é abaixo do ideal, o nitrogênio é liberado e acumulado na forma de amônia, ocorrendo elevação do pH e inibição dos microrganismos metanogênicos.

Souza (1984) aponta razões ideais de C/P entre 100 e 150. A razão C/P do RA deste estudo, em torno de 300, apresenta valores acima do recomendado na literatura, devido à baixa

concentração de fósforo, o que não deve acarretar problemas na DA, pois o fósforo é utilizado como nutriente em pequenas concentrações e, se for o caso, pode-se fazer uma suplementação.

Considerando os potenciais teóricos de metano dados por Raposo et al. (2011), a composição química do RA não favorece a produção de metano, visto que maiores potenciais se dão na ordem O&G, proteínas e carboidratos (1,014, 0,496 e 0,415 L CH<sub>4</sub>/ g SV, respectivamente). Em contrapartida, conforme visto experimentalmente por Silveira (2016), a elevada concentração de óleos e graxas (O&G) pode prejudicar a digestão anaeróbia de resíduos sólidos, pois estes apresentam baixas taxas de degradação e podem acumular no meio, e na sua metabolização são gerados ácidos graxos de cadeia longa, que são tóxicos para as arqueias metanogênicas. Problemas estes que com O&G baixos não devem ser observados na mistura de RA e LR avaliada neste estudo.

Uma análise da concentração de carbono na mistura mostra que a estratégia de codigestão anaeróbia dos resíduos pode ser eficaz ao reduzir a inibição por amônia, favorecer sinergismos entre os resíduos e diluir compostos prejudiciais, otimizando a produção de biogás e aumentando a qualidade do digestato e lodo digerido (MATA-ALVAREZ et al., 2014). O valor de sólidos voláteis do RA indica a quantidade de matéria orgânica presente neste resíduo, que é de 93%. Comparado com o obtido para o LR, que tem 60% de SV, pode-se verificar um maior fornecimento de matéria orgânica, de maior biodegradabilidade, na mistura dos resíduos, o que vai ao encontro do desejado no emprego da codigestão.

#### **4.2.5. Digestão anaeróbia do resíduo alimentar**

Anteriormente ao estudo de codigestão apresentado no próximo item, a biodegradabilidade anaeróbia do resíduo alimentar puro e com adição de inóculo na mesma condição apontada como a melhor nos experimentos com LR foi avaliada (I/S 2). A produção de biogás foi monitorada até completa estabilização, conforme apresentado na Figura 23.

Aos 35 dias, na condição 1 (somente RA) obteve-se um volume de biogás de 69,5 mL e na condição 2 (RA e inóculo I/S 2) de 99,5 mL. Novamente, a adição de inóculo favoreceu a degradação do resíduo, aumentando em 46% a produção de biogás. A adição de inóculo também acelerou o processo, verificando-se uma taxa de produção de biogás inicial (7,2 mL/d) bem maior que na condição sem inóculo (4,4 mL/d).

Diferentemente dos experimentos com LR, houve necessidade de ajuste do pH inicial da condição 1 (RA *in natura*) de 4,3 para 7,0 para o bom funcionamento da digestão anaeróbia. Este ajuste, feito com bicarbonato de sódio, aumentou a concentração de sódio no resíduo para

9920 mg/L, valor considerado inibitório para a digestão anaeróbia (ITO et al., 2005; VALLERO et al., 2003). O elevado valor da razão AGV/Alcalinidade indica que parte dos ácidos formados na hidrólise e acidogênese não foram assimilados na metagênese. Apesar da elevada alcalinidade adicionada ao meio ainda se obteve uma razão AGV/Alcalinidade alta, sendo a única neste experimento maior que 1,0, isto é, também crítico para a DA. Na condição 2, a adição do inóculo permitiu a obtenção de pH inicial adequado à digestão anaeróbia, não sendo necessário o ajuste de pH, verificando-se valores finais de pH e razão AGV/Alcalinidade compatíveis com uma digestão anaeróbia sem inibição por ácidos ou salinidade. Estes e outros resultados são apresentados na Tabela 20.

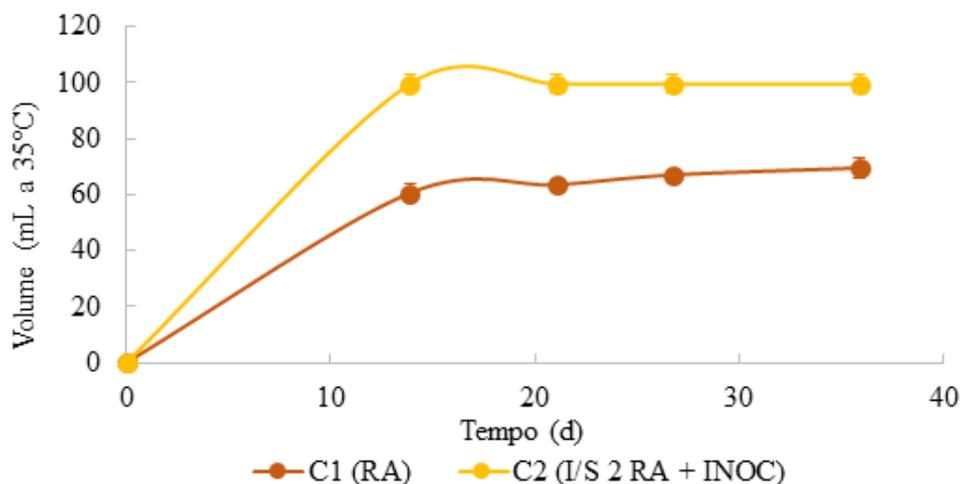


Figura 23-Volume de biogás (35°C, 1 atm) acumulado nos ensaios de digestão anaeróbia do RA sem e com adição de inóculo (I/S 2).

Ao comparar as remoções de SV obtidas nos experimentos conduzidos nas Etapas 1 e 2 com LR e nos experimentos com RA, pode-se verificar que o RA se mostra mais biodegradável. Provavelmente, isto se deve ao fato de que 93% do RA é matéria orgânica com maior grau de biodegradabilidade (basicamente carboidratos), em comparação com 61% de matéria orgânica de difícil biodegradação (hidrocarbonetos) e inibidores (metais) no LR.

Apesar dos experimentos serem preliminares, remoções de SV satisfatórias foram obtidas para o RA sem e com inóculo. Quando o volume de biogás produzido é relacionado com a carga de SV aplicados, mais uma vez confirma-se que a adição de inóculo ao RA é benéfica, aumentando em 3,8 vezes a PEB. No experimento com RA e inóculo obteve-se 63,47 mL biogás/g SV aplicados. Este valor é próximo ao encontrado por Silveira (2016) que, utilizando resíduo alimentar em condições semelhantes, obteve 79,3 mL de biogás/ g SV aplicados.

Tabela 20- Resultados dos ensaios de digestão anaeróbia do RA sem e com adição de inóculo (I/S 2)

Condição	Volume Biogás (mL)	pH final	AGV/ Alc.	SV aplic. (g)	SV final (g)	Remoção SV (%)	PEB (mL biogás/g SV aplic.)
C1 - RA	69,5±3,5	7,14±0,10	1,49	4,1	2,8±0,13	32,52±3,15	16,77±0,50
C2 - RA (I/S 2)	99,5±3,5	7,90±0,09	0,59	1,6	1,0±0,03	36,96±2,23	63,47±1,31

Volume de biogás a 35°C e 1 atm. Fonte: Autor do trabalho.

#### 4.2.6. Codigestão anaeróbia de lodo de refinaria e resíduo alimentar: Planejamento Experimental

Na digestão anaeróbia, observou-se baixa razão C/N, resultante de elevada concentração de nitrogênio no lodo. Esta característica pode levar à elevada produção de amônia e inibição da DA. Uma alternativa para aumentar a concentração de carbono orgânico e reduzir a razão C/N seria a codigestão anaeróbia deste lodo com outros resíduos contendo matéria orgânica facilmente biodegradável, como o resíduo alimentar (WANG et al., 2009; MATA-ALVAREZ et al., 2014). Apesar do aumento da razão C/N ser importante, neste experimento não foi possível de ser realizado, pois utilizou-se RA que também apresentou baixa razão C/N. No entanto, sabe-se que apenas o efeito sinérgico entre resíduos pode maximizar os ganhos em relação à digestão anaeróbia usual. Na Tabela 21 são apresentados os principais resultados do planejamento de experimentos.

Tabela 21- Resultados dos ensaios de codigestão anaeróbia no planejamento experimental.

Condição	Vol. Biogás (mL)	pH final	AGV/ Alc.	SV aplic. (g)	SV final (g)	Remoção SV (%)	PEB (mL biogás/g SV aplic.)
C1- LR	32,0	8,3	0,7	3,38	2,87	14,97	9,47
C2- LR 1:4	29,5	7,1	1,0	1,04	0,90	12,88	28,50
C3- LR 1:4 + 20% RA	150,0	7,6	0,4	1,86	0,90	51,81	80,67
C4- LR 1:4 + 20% RA (I/S 2)	56,2	7,6	1,3	1,46	0,95	34,96	38,39
C5- LR (I/S 2)	30,3	7,5	1,5	1,49	1,18	20,94	20,35
C6- LR + 20% RA (I/S 2)	19,0	7,5	1,4	1,52	1,15	24,69	12,49
C7- LR + 20% RA	50,7	7,7	0,8	3,73	2,50	33,05	13,59
C8- LR 1:4 (I/S 2)	40,7	7,3	2,1	1,23	0,86	30,67	33,00
C9 (P.C) - LR 1:2 + 10% RA (I/S 1)	42,0	7,6	1,0	1,56	1,25	19,87	26,92
C10 (P.C) - LR 1:2 + 10% RA (I/S 1)	38,0	7,8	1,0	1,56	1,24	20,51	24,36
C11 (P.C) - LR 1:2 + 10% RA (I/S 1)	30,0	7,8	1,0	1,56	1,19	23,72	19,23
C12 (P.C) - LR 1:2 + 10% RA (I/S 1)	25,0	7,8	1,0	1,56	1,18	24,36	16,03
C13 (P.C) - LR 1:2 + 10% RA (I/S 1)	24,0	7,9	1,0	1,56	1,16	25,64	15,38

Observa-se que o volume de biogás produzido está relacionado com a remoção de SV e, conseqüentemente, com a PEB. Em geral, o pH ficou neutro a ligeiramente básico, o que é interessante para o processo, visto que a adição do resíduo alimentar tende a reduzir o pH e inibir a DA. O pH do RA é ácido, mas sua mistura com o inóculo e LR favoreceu a manutenção de valores adequados de pH, mesmo com razões AGV/Alcalinidade acima do recomendado em quase todas as condições. Na Figura 24, a condição que apresentou maior remoção de SV foi a condição 3, com 51,81%. Em sequência, os melhores valores de redução de SV foram nas condições 4, 7 e 8, estas com mais de 30% de remoção.

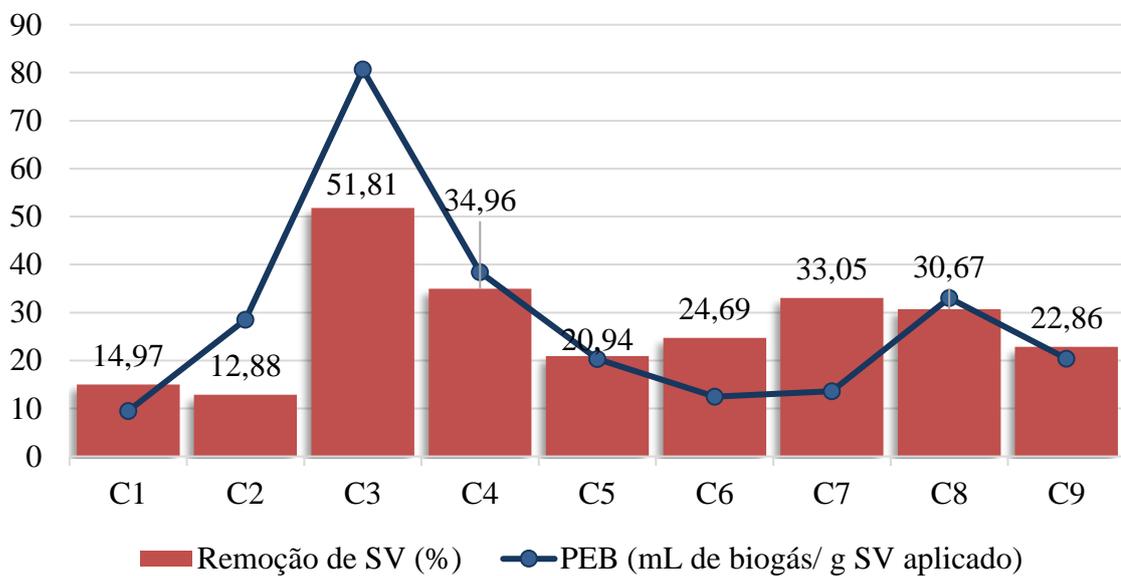


Figura 24- Remoção de SV e PEB nos ensaios de codigestão anaeróbia na etapa 4.

O modelo gerado para a variável resposta % SV removidos ( $Y_3$ ) no planejamento experimental é descrito na Equação 2, em relação às variáveis  $X_1$  (I/S),  $X_2$  (% de RA) e  $X_3$  (diluição do lodo) e suas interações. Esta equação apresentou  $R^2$  de 87,02% e erro puro de 1,92%. De acordo com o diagrama de Pareto dos efeitos padronizados (Figura 25), as variáveis  $X_2$  e  $X_3$ , bem como a interação  $X_1$ - $X_2$ , se mostraram significativas no modelo. Decidiu-se por manter as variáveis não significativas no modelo, pois a retirada reduziu o valor de  $R^2$  para 82,15%, e não fez com que os parâmetros regressão e falta de ajuste fossem atendidos simultaneamente.

$$Y_3 = 26,02 - 0,35x_1 + 16,25x_2 + 9,2x_3 - 12,2x_1x_2 + 0,85x_1x_3 + 5,35x_2x_3 \quad \text{Eq. (2)}$$

No diagrama de Pareto dos efeitos padronizados, apresentado na Figura 25, as variáveis que avançam a linha vertical cheia representam o que é significativamente diferente, isto é, o que influencia a decisão de melhor condição. A variável X2, que representa o % RA, se mostrou o fator mais significativo, bem como a interação entre X1 e X2 (I/S e % RA). A variável X3, que representa a diluição do lodo, também se mostrou significativa, enquanto sua interação com X2 foi ligeiramente significativa.

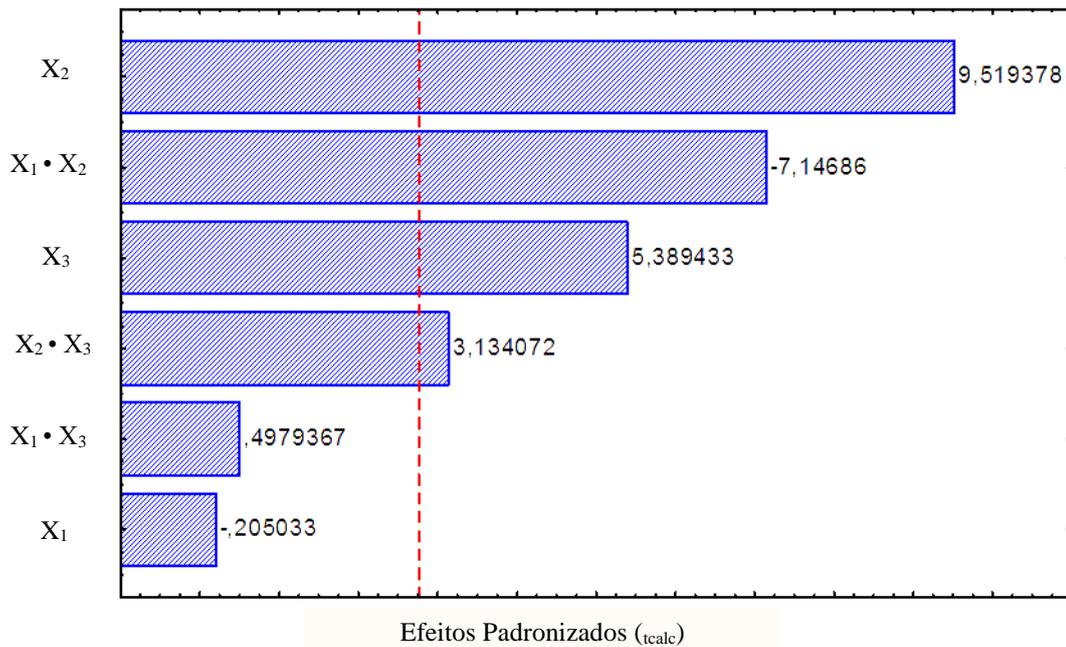


Figura 25- Diagrama de Pareto do planejamento experimental. X1 = I/S, X2 = % de RA e X3 = diluição.

A variável resposta para a escolha da melhor condição através do planejamento foi o percentual de remoção de SV, a principal forma de avaliação do tratamento de resíduos. Estes resultados foram realizados com 95% de confiança. A análise de variância (ANOVA) é apresentada na Tabela 22, sendo os valores obtidos satisfatórios, considerando todas as limitações de um experimento em pequena escala como o realizado neste trabalho. Na Figura 26, tem-se os gráficos de superfície, onde as regiões mais vermelhas representam as melhores condições, isto é, as maiores remoções de SV.

Tabela 22- Resultados obtidos na Análise de variância.

Fonte de Variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	F calc.	p-valor
Falta de ajuste	133,9	2	67,0	11,5	0,02198
Erro Puro	23,3	4	5,8	-	-
Total	1211,3	12	-	-	-

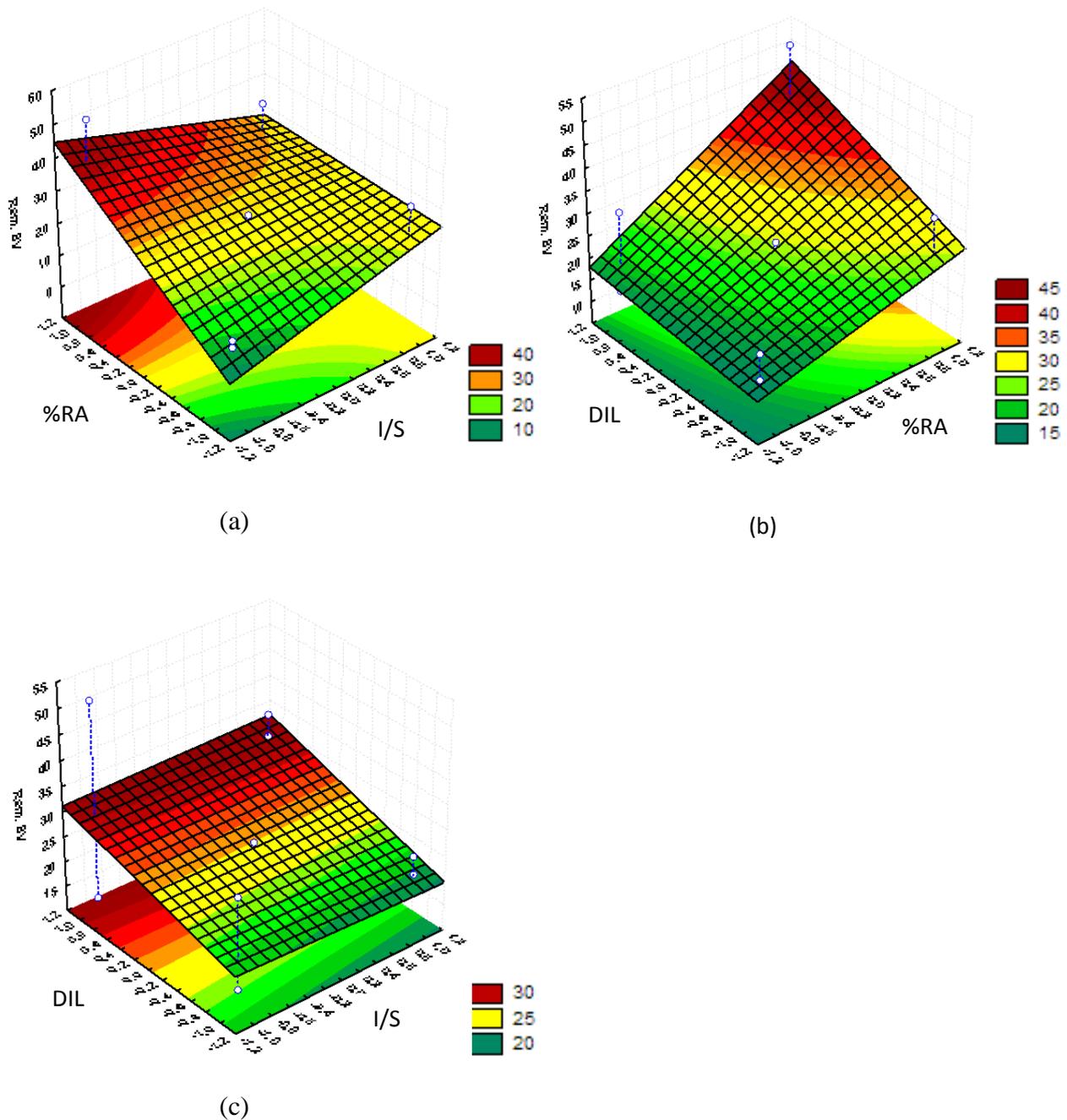


Figura 26- Gráficos de superfície de resposta obtidos no planejamento experimental. X1 = I/S, X2 = % RA e X3 = diluição do lodo. (a) cruzamento entre as variáveis X1 e X2; (b) relação entre as variáveis X2 e X3; (c) relação entre as variáveis X3 e X1.

No primeiro cruzamento de variáveis (Figura 26a), quanto menor a razão I/S e maior o % RA maior a remoção de SV. Isto é, mesmo sem inóculo no sistema, tem-se uma boa resposta da digestão do lodo de refinaria. Isto pode ter ocorrido devido à existência de microrganismos no LR capazes de efetuar a digestão, dispensando-se o uso de inóculo. Pode-se considerar que a razão I/S média (perto de 1) também apresenta boa remoção de SV. Considerando o % RA e

a diluição do lodo (Figura 26b), confirma-se que o maior % RA é novamente a região de melhor resultado, ou seja, quanto mais RA, mais SV de fácil digestão estão disponíveis. A interferência da diluição, que já dá indícios na Figura 26b, fica mais clara ao se analisar a Figura 26c, que mostra que, independente da razão I/S escolhida, a diluição deve ser alta para se obter melhores resultados.

Sendo assim, pode-se concluir, com base neste planejamento, que a melhor resposta em termos de % SV se dá com I/S baixo, % RA alto e maior diluição do lodo. Isto é, sem inóculo, com 20% de RA e diluição 1:4 (correspondente aos níveis -1, 1 e 1, respectivamente). Não se optou por realizar a etapa de validação dos resultados pois a melhor condição encontrada no planejamento já havia sido testada na condição C3 (Figura 24 e Tabela 21).

### **4.3. Reavaliação da matriz SWOT a partir de dados primários da digestão anaeróbia.**

Após a apresentação das tecnologias para tratamento e destinação do lodo e identificação da digestão anaeróbia como uma vantajosa opção para o seu tratamento, com base em dados secundários, foi realizada uma série de experimentos de digestão a fim de comparar os dados obtidos com a análise SWOT, focando no tipo de resíduo estudado e nos dados primários (Tabela 23).

Tabela 23- Quantidade de elementos confirmados, refutados e inconclusivos para aplicação da SWOT para o LR.

Elemento	Confirmadas	Refutadas	Inconclusivas	% validado para LR
Forças	4	3	1	50
Fraquezas	3	1	1	60
Oportunidades	4	1	2	57
Ameaças	3	1	-	75
Total	14	6	4	58,3

Assim, foi possível confirmar pontos característicos da técnica e também observar que alguns dos pontos descritos na teoria e apresentados na matriz SWOT a partir de dados secundários não se confirmam na prática em experimentos aplicados para obtenção de dados primários ou precisam de mais estudos ou ajustes metodológicos para a obtenção dos resultados esperados.

#### Forças (S)

O elemento com maior número de fatores neste estudo foi a força (S), ou seja, a Digestão anaeróbia (DA) apresentou mais pontos positivos e internos ao processo. O principal objetivo quando foi escolhido o tratamento por DA é a busca por redução do grau poluidor e da concentração de matéria orgânica (S5) (METCALF e EDDY, 2014). Nas etapas experimentais, esta redução significativa só foi alcançada na Etapa 4, na qual foram cruzadas as variáveis de estudo, incluindo a oportunidade de junção a outros resíduos através da codigestão. Nesta etapa, foi apontada como a melhor condição em termos de remoção de SV (condição 3), com 51,8% de redução de SV. Isto significa que a força foi comprovada, mas depende das condições e tipo de resíduo, já mencionados como fraquezas e ameaças, respectivamente. Sem a adição do resíduo alimentar (RA), a digestão do lodo de refinaria (LR) mostrou um melhor resultado na condição 8 (C8) da Etapa 4, alcançando 33% de remoção. Em comparação, os valores são menores do que o encontrado na literatura (METCALF e EDDY, 2014) para lodos de esgotos, cerca de 60%. No entanto, isto pode ser atribuído à diferença de composição dos lodos de esgotos e industriais. E ainda, o LR que foi utilizado neste estudo é oriundo de um sistema de lodos ativados do tipo aeração prolongada, que já estabiliza parcialmente o lodo, dificultando uma redução adicional, visto que a parte mais facilmente biodegradável já foi reduzida durante o tratamento do efluente nos lodos ativados.

Sobre o Fator S6, a ocupação de áreas menores pela tecnologia DA, não se pode concluir a partir de experimentos em escala de bancada. Este fator diz respeito a uma característica da construção em escala real. No entanto, é comprovado que em escala real a dimensão de uma planta de digestão, independente do resíduo, é consideravelmente menor que nos aterros, a principal disposição atual.

A produção do biogás (S1) é a força que mais agrega valor de sustentabilidade ao processo (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; METCALF e EDDY, 2014). Emprega a transformação de um resíduo, usualmente descartado, em energia com os preceitos da PNRS. Em todas as etapas experimentais, foi observada a produção de biogás a partir do LR e RA, juntos por codigestão ou não. Os maiores volumes obtidos foram 194,5 mL, na Condição 1 da Etapa 1, com lodo de refinaria *in natura* em alta concentração; e na Condição 3 da Etapa 4, com codigestão atingindo 150 mL de biogás. Ou seja, mais uma força apresentada pela literatura (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; METCALF e EDDY, 2014) foi confirmada. Este biogás, se transformado em energia, poderia também suprir a demanda energética do processo durante a operação (ADAR et al., 2016), como mencionado como Força S4,

principalmente se destinada ao aquecimento, o que traz mais economia e ganhos ambientais. Esta Força S4 não foi possível de ser confirmada e nem refutada completamente através dos experimentos de bancada (pequena escala), pois não foi mensurada esta conversão energética e, por sua vez, não foi testada sua efetividade. Porém, entende-se que dependeria principalmente de altos volumes de biogás com grandes quantidades de metano presentes, (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014), o que não foi possível se verificar neste trabalho.

No gerenciamento de lodo, após o tratamento, são comuns etapas de desaguamento e/ou desidratação (S7) a fim da redução de massa/volume, etapa que segundo Adar et al. (2016) poderia ser dispensada nos tratamentos por DA. Esta não necessidade seria de grande importância, pois promove a minimização de custos e diminui etapas. No entanto é importante dizer que esta necessidade varia de acordo com a característica do resíduo final e sua destinação. Apesar da redução de massa obtida com a DA, nos experimentos (mais discutido na oportunidade 4), foi observada ainda a possibilidade de desaguamento e, assim, a massa e volume podem ser reduzido ainda mais antes de encaminhado à disposição final. Em situações da disposição final na agricultura, comum em lodos de esgoto, não é necessário o desaguamento (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; METCALF e EDDY, 2014). Entende-se que para este tipo de resíduo, que usualmente terá seus rejeitos encaminhado aos aterros, esta etapa não poderia ser dispensada para todas as condições e assim refutando esta força.

A DA é considerada uma tecnologia madura (S2), sendo uma das tecnologias mais antigas e bem estudadas para a estabilização de resíduos orgânicos do mundo (ARIUNBAATAR et al., 2014). Na atualidade, principalmente utilizada para o tratamento de resíduos como os provenientes de Estações de Tratamento de Esgoto ou em biodigestores para a geração de biogás e, conseqüentemente, para gerar energia. É um processo que ocorre na natureza todo tempo. Através de uma série de interações metabólicas entre vários grupos de microrganismos, que cooperam entre si, autorregulando (CHERNICHARO, 2007). Esta característica é tida como uma importante força, pois neutraliza ou diminui o impacto de diversas fraquezas e ameaças do processo. Uma vez que esta técnica já foi observada, estudada e suas limitações e/ou fatores que a influenciam são amplamente conhecidos, discutidos e com expertise desenvolvida para tratamento dos pontos negativos. Para o desenvolvimento experimental foi muito importante esta facilidade de informações para dirimir problemas operacionais e possibilitar os ajustes determinados na sequência das etapas experimentais.

A literatura (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; METCALF e EDDY, 2014) aponta que pode haver também uma redução do odor oriundo da redução biológica de sulfato por meio da redução do sulfeto no lodo digerido (S3). Não foi possível mensurar se houve redução no odor, visto que o odor da amostra recebida não era muito significativo por ser um lodo parcialmente estabilizado em um sistema de lodos ativados com aeração prolongada e por falta de metodologia adequada. Mas, foi percebida uma mudança do odor característico no resíduo final em todos os experimentos. O odor só seria mais significativo em grande escala e se utilizada uma grande quantidade de resíduo. A diminuição do odor é uma força, pois pode influenciar na localização de uma unidade de tratamento e aspectos sociais, com uma possível população próxima, como já comentado. Foi definido como inconclusivo este fator para os experimentos em escala de bancada.

Outra força do processo de DA é que além de reduzir volume e matéria orgânica, também pode reduzir a quantidade de microrganismos patógenos (S8). A depender do afluente utilizado nos tratamentos de efluentes secundários que geram o LR pode haver uma alta concentração de patógenos, principalmente se o afluente for sanitário. A DA se torna vantajosa, também por este motivo, no tratamento de lodos de estação de tratamento de esgoto. No caso estudado, ainda que haja uma parte de efluente sanitário no tratamento do efluente de refinaria, este é diluído nos elevados volumes das correntes industriais. Além disto, características do efluente industrial não facilitam a manutenção de atividade de microrganismos patogênicos. Tudo isto faz com que este item tenha pouca importância no caso da DA de LR. Acreditando que a quantidade de patógenos seja baixa ou inexistente, não foram realizados testes e, portanto, não se pode concluir se houve ou não redução dos patógenos no presente estudo.

#### Fraquezas (W)

A maior fraqueza do processo é que o principal subproduto, o biogás, para ser utilizado necessita de purificação (W1) (ADAR, 2016; ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014; THI et al., 2016), o que pode tornar não vantajosa economicamente esta utilização, ainda que seja favorável do ponto de vista ambiental. O biogás obtido tem uma composição heterogênea, onde geralmente até 60% é CH<sub>4</sub> (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014). É necessária a separação para utilização desta fração de maior interesse que tem maior poder calorífico e é o que seria efetivamente utilizado no processo ou como uma possível comercialização quando transformada em energia elétrica. Mais estudos são necessários para

comprovar o quanto esta fraqueza pode impactar nas vantagens da digestão anaeróbia para o LR e como neste trabalho não foi possível identificar a % de Metano, não se pode definir a dificuldade nesta purificação.

Como foi apresentado na sequência experimental, Etapas 1 a 4, a todo tempo foi necessário o controle dos parâmetros, com obtenção de resultados mais favoráveis apenas sob determinadas condições na Etapa 4. Comprovando que para o tratamento ocorrer de forma satisfatória é necessário um alto controle operacional (W2), sendo considerada uma fraqueza, pois pode comprometer todo o processo.

Um dos principais desafios quando se busca a promoção de tecnologias mais sustentáveis é conciliar os benefícios socioambientais com a viabilidade econômica. Apesar da DA ser considerada de forma geral um tratamento barato, principalmente quando comparado com a incineração (GINESTET, 2007), inicialmente há um custo elevado que deve ser considerado. Pensando na escala real, é necessário elevar a temperatura de todo o volume do reator por aquecimento e esta é considerada uma fraqueza tanto do ponto de vista energético (W3) quanto do ponto de vista econômico (W4). Para escala de bancada este ponto não foi significativo.

A depender da estratégia a ser utilizada para o tratamento e os volumes a serem tratados em uma unidade contínua, em escala real, o tempo de operação longo pode ser considerado uma fraqueza do processo (W5). Nos experimentos deste trabalho, foram utilizados 30 dias de operação, para seguir a metodologia padrão BMP. Este tempo pode variar para menos, em condições mais custosas e otimizadas, ou para mais dependendo do tipo de resíduo a ser tratado e do emprego de parâmetros mais brandos e econômicos.

#### Oportunidades (O)

Uma das principais oportunidades é a redução de massa e volume de resíduo, o que acarreta uma diminuição de custos com transporte e quantidade de resíduo a ser encaminhado à disposição final (O4). Observou-se que os resultados também comprovam este ponto positivo, expressos em ST. Apesar de no trabalho a remoção ter sido quantificada em SV, considerar ST é mais correto quando se discute massa total. Na Tabela 24 é apresentado o resultado da redução de ST em todas as etapas do trabalho, sendo observados valores mais altos para os controles com inóculo nas Etapas 1 e 2, na melhor condição da Etapa 3 atingiu-se 27,2% de redução de

ST para a digestão do RA, e na Etapa 4 sob melhores condições de codigestão atinge-se até 43% de redução de ST.

Tabela 24- Remoção de ST (massa de resíduo) em cada condição da etapa experimental (%)

Condição	Etapa 1	Etapa 2	Etapa 3	Etapa 4
C1	1,62	6,54	8,51	9,32
C2	29,25	10,74	27,21	10,47
C3	36,73	14,99	-	43,08
C4	6,22	7,88	-	28,62
C5	3,31	8,13	-	19,51
C6	-	-	-	25,32
C7	-	-	-	23,00
C8	-	-	-	27,90
C9	-	-	-	16,37

Considerando a análise das Oportunidades 1 e 3, referentes às possíveis comercialização do biogás obtido e inclusão de créditos de carbono, respectivamente, não se pode confirmar o sucesso. Apesar de se quantificar PEB de até 80,7 mL biogás/g SV aplicados na melhor condição (Etapa 4, Condição 3), não foi possível obter a composição do biogás, o que dificulta esta conclusão e comparação. A comercialização só é possível e viável se houver uma grande quantidade de metano presente na composição do biogás, cuja utilização é função de seu poder calorífico. Segundo Andreoli; von Sperling; Fernandes (2014), o biogás com 70% de CH<sub>4</sub> apresenta um poder calorífico de aproximadamente 23.380 kJ/m<sup>3</sup>, isto é, 6,5 kW/m<sup>3</sup>, valores que representam 63% do poder calorífico do gás natural que hoje é amplamente utilizado. Além da geração de energia, seria possível reduzir as emissões de carbono, podendo ser convertido em créditos de carbono com incentivos de projetos de mecanismos de desenvolvimento limpo, os MDL (ADAR et al., 2016; THI et al., 2016).

De acordo com os resultados, pode-se observar que uma das oportunidades que se confirma e traz grandes benefícios é referente à aceitação de sinergia com outros resíduos (O5) através da codigestão. E os resultados expressos da Etapa 4 da parte experimental confirmam esta afirmação. A adição do RA aumentou a remoção de SV de 14,97%, considerando a Condição 1 (somente LR), para 51,8%, considerando a Condição 3 (melhor condição com RA), ou seja, utilizar deste artifício foi benéfico e uma importante oportunidade aproveitada.

Outro ponto que merece atenção é o fato de ter ocorrido uma redução da massa de matéria orgânica em todos os experimentos e poderia ser utilizado em solos como fertilizante (O2) (ADAR, 2016; METCALF e EDDY, 2014; THI et al., 2016). Mas, não é comum a aplicação de lodo industrial como condicionadores de solo, principalmente devido a sua composição. No LR, como pode ser observado na caracterização, há pequenas concentrações de variados metais e isto torna impeditivo seu uso na agricultura, conforme a legislação vigente (BRASIL, 2010). Sendo assim, para este estudo esta oportunidade se torna inválida para o LR, porém válida para outros resíduos passíveis da DA.

Hoje em dia a legislação internacional está mais avançada que a brasileira quando se fala em digestão anaeróbia (O6). Na Europa, por exemplo, houve um crescimento da implantação de plantas de digestão anaeróbia, principalmente pela legislação de alguns países proibirem o aterramento de matéria orgânica (REIS, 2012). Com isto espera-se que o Brasil e outros países sigam esta linha nos próximos anos. Porém, este ponto depende diretamente de interesses e esforços políticos que não são facilmente mensurados.

Os aspectos sociais da tecnologia também devem ser considerados. Verifica-se que segundo o Fator O7, não há restrições de localização. Nos experimentos não foi observado nenhum ponto que iria contra os benefícios frente a outras tecnologias mais utilizadas. Na DA não ocorrem problemas relacionados à queima de resíduos, isto é, poluição ambiental associada, como na incineração. Também não há oposição pública, como no caso de aterros, principalmente em grandes cidades, seja por dificuldade de grandes áreas ou a liberação de odores.

#### Ameaças (T)

A principal ameaça, confirmada nos experimentos, é referente à dependência de ter bons resultados relacionados à característica dos materiais de entrada (T1). Ao longo das 4 etapas experimentais, buscou-se melhorias simulando condições reais de entrada dos resíduos. No planejamento experimental, buscou-se encontrar as melhores condições de mistura de LR e RA e obtiveram-se melhores resultados em uma determinada condição, provando assim que o tipo e concentração de resíduo de entrada influenciam diretamente nos resultados da tecnologia de DA. Observou-se que de fato estas condições são muito sensíveis e determinantes. Ou seja, embora a técnica funcione para o LR e RA, a DA pode não ser aplicável a determinados tipos de resíduos.

Quanto aos riscos de explosão e vazamentos (T4), é uma das ameaças mais graves, pois põe em risco vidas humanas (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014.). É um fator que merece muita atenção e, com isso, devem ser mitigadas as chances de ocorrência. Não se pode comparar frascos de 90 mL utilizados na escala de bancada com conteúdo de centenas a milhares de m<sup>3</sup> de reatores reais, pois a escala e, conseqüentemente, a quantidade de metano produzido influenciam. A explosão, geralmente após vazamentos, só ocorre se houver uma combinação de biogás com alto teor de metano na presença de uma fonte de calor (ANDREOLI; VON SPERLING; FERNANDES, 2014). E ainda, o vazamento de metano pode contribuir com o aumento do efeito estufa o que se torna também um ponto de atenção no transporte e em operações envolvendo biogás (GIZ & FACHVERBAND BIOGAS, 2016). No entanto, se houver controle e segurança, tais inconvenientes podem nunca ocorrer.

A temperatura, que em todos os experimentos foi bem controlada, é um fator essencial para que ocorram as reações bioquímicas se completarem na DA (METCALF e EDDY, 2014). Este ponto está diretamente ligado a T2, apesar de que se supõe que o digestor pode ser geograficamente localizado em qualquer ambiente e sem grandes impactos em grandes centros urbanos (AICH e GHOSH, 2016). Contudo, ao considerar o clima, este pode ser entendido como uma ameaça, pois se o local for tradicionalmente frio haverão gastos elevados para o aquecimento inicial de um digestor em escala real e, ainda, para a manutenção de sua temperatura ao longo da operação, elevando os custos e inviabilizando o processo, uma vez que a energia gasta será superior que a recolhida em biogás produzido e maior que os benefícios do tratamento em si (ADAR, 2016; AICH e GHOSH, 2016). A instalação em locais como a cidade Rio de Janeiro, por exemplo, é bem mais vantajosa, pois a temperatura naturalmente fica próxima a 30-35°C (CLIMATEMPO, 2019) (valores recomendados para DA), sendo necessários baixos ajustes, o que ficaria inviável comparando com localidades com temperaturas baixas. Nos experimentos não ocorreram problemas de alcance e manutenção de temperatura na escala laboratorial, com emprego de temperatura em estufas ou salas climatizadas e o ambiente externo estava sempre próximo a 26°C.

Para o fato de não haver uma legislação específica para a biodigestão de resíduos (T3), acredita-se que há uma dependência de políticas para a tecnologia avançar, mesmo que a PNRS brasileira, Lei n° 12.305 de 2010, junto com o decreto 7.404 de 2010, estimulem em teoria a implantação de prioritariamente tratamentos com o uso de biodigestores no Brasil e fortaleça os argumentos de incentivos para a implementação de projetos de biodigestão de resíduos

sólidos orgânicos, principalmente urbanos. Ainda não há uma regulamentação específica que contemple o tratamento dos resíduos industriais via DA com incentivos político-econômicos e que estabeleça diretrizes a serem seguidas. Para a utilização do biogás apenas, existem algumas regulamentações e especificações (ANP, 2015).

## 5. CONCLUSÕES

Como conclusões deste trabalho, tem-se:

No levantamento dos métodos de tratamento e destinação de resíduos sólidos aplicáveis aos lodos secundários gerados no tratamento de efluentes de refinarias de petróleo, verificou-se que, embora seja considerada uma tecnologia madura, a digestão anaeróbia não é utilizada.

Verificou-se, por meio da análise da matriz SWOT da digestão anaeróbia, obtida com dados secundários, que a digestão anaeróbia é uma tecnologia favorável. Considerando os critérios de sustentabilidade, esta deve se desenvolver mais frente ao cenário comparativo com outras tecnologias atualmente utilizadas. Isto se deve, principalmente, aos esforços e restrições da legislação, que cada vez mais devem inibir tecnologias que vão contra à sustentabilidade.

Na etapa experimental realizada para avaliar a digestão anaeróbia somente do lodo de refinaria e a codigestão anaeróbia de mistura de lodo de refinaria e resíduo alimentar foram obtidos dados que comprovam que tanto a digestão como a codigestão são alternativas para o tratamento do lodo secundário.

A digestão anaeróbia permite a redução do teor orgânico do lodo a ser descartado (redução de SV de até 26 %). Nas melhores condições de codigestão anaeróbia de lodo com resíduo alimentar, verificaram-se aumentos da ordem de 100% na redução de SV (52%) e na produção específica de biogás (81 mL biogás/g SV aplicados), em comparação à digestão anaeróbia do lodo somente (39 mL biogás/g SV aplicados), o que aumenta a eficiência de estabilização dos resíduos, facilitando sua disposição final e reduzindo problemas operacionais nos aterros que receberão os rejeitos.

No planejamento experimental realizado para avaliar a codigestão, maiores reduções de SV foram observadas em condições de menor razão I/S (sem adição de inóculo), maior % de RA (20 %) e maior diluição do lodo de refinaria (diluição 1:4, ou seja, com o lodo secundário sem desaguamento). Nestas condições atingiu-se 52% de redução de SV e produção específica de biogás de 81 mL biogás/g SV aplicados.

Na comparação dos fatores obtidos na análise SWOT da digestão anaeróbia com os resultados obtidos na etapa experimental, observaram-se diferenças e similaridades. Destaca-se, nas forças, que a remoção de SV foi menor do que a usualmente encontrada na digestão de somente lodo, mas com valores satisfatórios na codigestão com resíduo alimentar. Nas

fraquezas, não houve um bom controle operacional. Quanto às oportunidades, conclui-se que os experimentos em escala de bancada mostraram que a tecnologia é factível em escala industrial para o LR, especialmente ao se considerar a utilização de biogás, seja para o aquecimento no próprio processo, diminuindo gastos de aquecimento inicial, ou na disposição de créditos de carbono. Todos os fatores não concordantes entre a matriz SWOT teórica e os ensaios realizados experimentalmente confirmaram uma importante ameaça, que é a alta dependência do fluxo de entrada de material. Os problemas ocorridos na parte experimental provavelmente se devem à matéria orgânica em digestão e aos ajustes necessários na metodologia, precisando-se de mais estudos para comprovação desta teoria.

Dos fatores elencados para a matriz SWOT da digestão anaeróbia obtida a partir de dados secundários, quase 60% foi possível validar experimentalmente com dados primários neste trabalho, 25% foram refutados pelos experimentos e 15% foram inconclusivos, necessitando de mais estudos, preferencialmente em escala real.

Com destaque para a produção de biogás, que após purificação pode ser usado diretamente para aquecimento ou na conversão de energia, e para a remoção de matéria orgânica com a adição de resíduo alimentar, pode-se concluir que a digestão anaeróbia é uma das tecnologias mais interessantes para o tratamento de lodos secundários das refinarias. Além disto, a digestão anaeróbia é uma das tecnologias mais interessantes em relação a outras formas de tratamento e alto potencial de valorização energética. Tais benefícios foram comprovados a partir de dados da literatura e de uma avaliação experimental. Portanto, a digestão anaeróbia deve ser considerada para o tratamento de lodos secundários gerados em refinarias, especialmente em mistura com outros resíduos facilmente biodegradáveis, como o resíduo alimentar avaliado.

## 6. SUGESTÕES

Para trabalhos futuros, sugere-se:

- Realizar experimentos de digestão e codigestão anaeróbia com mais réplicas, a fim de reduzir os desvios-padrão e obter maior confiabilidade nos resultados;
- Quantificar o metano presente no biogás e investigar o seu poder calorífico;
- Avaliar processos de utilização e viabilidade de comercialização do biogás;
- Otimizar a codigestão anaeróbia para lodo de refinaria e resíduo alimentar testando a reprodutibilidade da melhor condição;
- Realizar experimentos e identificar os elementos SWOT para lodo de refinaria em escala real;
- Comparar os empreendimentos de digestão anaeróbia e aterros afim de avaliar a ocupação de áreas por quantidade de resíduo tratado e disposto;
- Testar, na codigestão anaeróbia, a sinergia de outros resíduos com o lodo de refinaria;
- Fazer uma análise econômica da digestão e codigestão anaeróbia dos resíduos;
- Realizar pesquisas (aplicação de questionários) com profissionais do setor e estudiosos para dar peso a cada fator elencado na matriz SWOT com maior confiabilidade;
- Fazer matriz SWOT de aterros, incineração e outras tecnologias de tratamento e disposição de resíduos;
- Propor uma análise comparativa por matriz SWOT entre as tecnologias para tratamento e disposição de resíduos.

## REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, Norma Brasileira NBR 10004: Classificação dos Resíduos, 2004.

ABRAHAM, M.A.; NGUYEN, N., 2003. Green Engineering: Defining the Principles and Results from the San Destin Conference.

ADAR, E.; KARATOP, B.; İNCE, M.; BILGILI, M.S. Comparison of methods for sustainable energy management with sewage sludge in Turkey based on SWOT-FAHP analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 62. p. 429–40. 2016.

AGDAG, O.N., SPONZA, D.T. Co-digestion of mixed industrial sludge with municipal solid wastes in anaerobic simulated landfilling bioreactors. *Journal of Hazardous Materials*. v. 140, p. 75-85, 2007.

AEA- Agência Europeia do Ambiente. Da produção dos resíduos: o sistema alimentar. 2014. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/pt/sinais-da-aea/sinais-2014/artigos/da-producao-aos-residuos-o>>. Acesso em 05 de novembro de 2017.

AICH, A.; GHOSH, S.K. Application of SWOT analysis for the selection of technology for processing and disposal of MSW. *Procedia Environmental Sciences*. v.35. p. 209-228. 2016.

ALATRISTE-MONDRAGON, F.; SAMAR, P.; COX, H.H.J.; AHRING, B.K.; IRANPOUR, R. Anaerobic co-digestion of municipal, farm, and industrial organic wastes: A survey of recent literature. *Water Environment Research*. v. 78, p. 607–636, 2006.

ALEXANDRE, V.M.F. Efeito de biossurfactantes na redução da geração de biomassa em sistemas de lodos ativados (Tese de Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Rio de Janeiro, 2018.

ALEXANDRE, V.M.F. Redução de descarte de lodo em sistema de Lodos Ativados tratando efluente de refinaria de petróleo (Mestrado em Ciências) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Rio de Janeiro, 2013.

ALVES, F.; BRITO, O. Incineração: ainda existe capacidade ociosa, *Saneamento Ambiental*, v. 33, p. 22-28, 1995.

ANASTAS, P.T.; WARNER, J.C., 1998. *Green Chemistry: Theory and Practice*. New York: Oxford University Press; 1998.

ANASTAS, P.T.; ZIMMERMAN, J.B., 2003. *Design Through the Twelve Principles of Green Engineering*.

ANDRADE, J.C.; OLIVEIRA, V.M.; MOTA, H.C.M.; LOPES, E.M.; FONTÃO, H. Aplicação da análise SWOT para identificar oportunidades para o desenvolvimento econômico e social. Anais. XIII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e IX Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba. Cruzeiro, 2008.

ANDREOLI, C.V.; VON SPERLING, M.; FERNANDES, F. Lodo de Esgotos: Tratamento e Disposição Final. 2ª Ed., Editora UFMG, Belo Horizonte, 2014.

ANP- Agência Nacional do Petróleo. Resolução ANP nº 8. 2015. Disponível em <<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2015/janeiro&item=ranp-8--2015>>. Acesso em 10 de fevereiro de 2019.

ANP- Agência Nacional do Petróleo. Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. 2018. Disponível em <[http://www.anp.gov.br/images/publicacoes/anuario-estatistico/2018/anuario\\_2018.pdf](http://www.anp.gov.br/images/publicacoes/anuario-estatistico/2018/anuario_2018.pdf)>. Acesso em 02 de fevereiro de 2019.

APHA, 2005. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 21<sup>nd</sup> Ed.: American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Washington, DC.

ARAÚJO, L.A.; NICOLAIEWSKY, E.; FREIRE, D.D.C. O estudo de caso do gerenciamento de resíduos sólidos em uma refinaria de petróleo. 2º Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás. Anais, Rio de Janeiro, 2003.

ARAÚJO, O.Q.F.; MEDEIROS, J.L.; YOKOYAMA, L.; MORGADO, C.R.V. Metrics for sustainability analysis of post-combustion abatement of CO<sub>2</sub> emissions: Microalgae mediated routes and CCS (carbon capture and storage). *Energy*, v. 92, p. 556–568, 2015.

ARIUNBAATAR, J., PANICO, A., ESPOSITO, G., PIROZZI, F., LENS, P.N.L. Pretreatment methods to enhance anaerobic digestion of organic solid waste. *Applied Energy*, v. 123, p. 143–156, 2014.

ASTM - American Society for Testing and Materials. Standard Terminology Relating to Petroleum, Petroleum Products, and Lubricants. Annual Book of Standards. ASTM D4175. Pennsylvania, v. 05. 2008.

AZEVEDO, M. A. Avaliação do Risco à Saúde da População Vizinha às Áreas de Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos: O Aterro Sanitário como Cenário de Exposição Ambiental. São Carlos, 2004. 263p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

BADSHAH, M., LIU, J., MATHIASSEN, B., The Biomethane Potential of Chemically Defined Substrates Evaluated Using Automatic Methane Potential Test System, Lund University Publications, Lund, Sweden, 2012.

BADSHAH, M.; LAM, D.M.; LIU, J.; MATTIASON, B. Use of automatic methane potential test system for evaluation the biomethane potential of sugarcane bagasse after different treatments. *Bioresource Technology*, v. 114. p. 262-269. 2012.

BAHADORI, A. *Waste Management: in the chemical and Petroleum Industries*. United Kingdom, 2014.

BATEMAN, T.S.; SNELL, S.A. *Administração: Novo Cenário Competitivo*. 2ª ed. São Paulo: Atlas, 2010.

BELOBORODKO, A. et al. SWOT analysis approach for advancement of waste-to-energy cluster in Latvia. *Energy Procedia*. v. 72. p. 163-169. 2015.

BENAVIDES, R.J.P. *Administração*. 2ª ed. México D.F.: McGraw-Hill/Interamericana Editores, S.A. México, 2014.

BEN-ELI, M., 2005. *Sustainability. The Five Core Principles. A New Framework*. New York, 2005.

BORGES L. Como desenvolver uma matriz ou análise SWOT (FOFA). 2013. Disponível em: <https://blog.luz.vc/o-que-e/como-desenvolver-uma-matriz-ou-analise-swot-fofa/>. Acesso em: 12 de janeiro de 2019.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Política Nacional de Resíduos Sólidos. Brasília: Governo Federal, 2010.

BROWNE, J.D.; MURPHY, J.D. Assessment of the resource associated with biomethane from food waste. *Applied Energy*, v. 104, p. 170-177, 2013.

BRUNHARA, G.F.; MAIA, D.R.S.; CAMMAROTA, M.C.; GUIMARÃES, C.S. Desenvolvimento de biodigestores anaeróbios para produção de biogás utilizando resíduo alimentar e esgoto. 11º Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica. Campinas, 2015.

CECCHI, F. Anaerobic digestion of municipal solid waste thermophilic vs. mesophilic performance at high solids. *Management & Research*, v. 9, p. 305-315, 1991.

CETESB. Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Aterros sanitários. Apostilas Ambientais. São Paulo, 1997.

CHERNICHARO, C.A.L. *Reatores Anaeróbios*. 2ª Ed. Belo Horizonte: DESA, UFMG, Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias, v. 5. 380p. 2007.

CHYNOWETH ,D.P.; TURICK, C.E.; OWENS, J.M.; JERGER, D.E.; PECKQ, M.W.; Biochemical methane potential of biomass and waste feedstocks. *Biomass Bioenergy*. v. 5. p. 95–111. 1993.

COMINO, E.; ROSSO, M.; RIGGIO, V. Investigation of increasing organic loading rate in the co-digestion of energy crops and cow manure mix. *Bioresource Technology*, v. 101(9), p. 3013-3019. 2010.

CLIMATEMPO. Previsão do tempo: 15 Dias - Rio de Janeiro – RJ. 2019. Disponível em: <https://www.climatepo.com.br/previsao-do-tempo/15-dias/cidade/321/riodejaneiro-rj>. Acesso em 23 de fevereiro de 2019.

DILALLO, R.; ALBERTSON, O.R. Volatile acids by direct titration. *Journal Water Pollution Control Federation*, vol. 23, nº 4, p. 356-365, 1961.

DO BRASIL, N. I.; ARAÚJO, M. A. S.; SOUSA, E. C. M. *Processamento de Petróleo e Gás*. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

DUBOIS, M.; GILLES, A.; HAMILTON, J.K.; REBERS, P.A.; SMITH, F. Colorimetric method of determination of sugars and related substances. *Analytical Chemistry* v. 28, p.350-355, 1956.

DUTRA, D.V. A análise SWOT no brand DNA process: um estudo da ferramenta para aplicação em trabalhos em branding. *Dissertação (Mestrado em Design e Expressão Gráfica)*, Universidade Federal de Santa Catarina, Centro de Comunicação e Expressão. 241 p. Florianópolis, SC, 2014.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). *Manual de métodos de análise de solo*. 2ª Ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos. 2011.

ENACHE, E. A SWOT analysis on the waste management problem in Romania in 2010. *Theoretical and Applied Economics*. v. 17. p. 101-108, 2010.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. *Balanço Energético Nacional (BEN) 2018: Ano base 2017, 2018*. Disponível em < <https://ben.epe.gov.br> >. Acesso em 12 de fevereiro de 2019.

FAO - Food and Agriculture Organization. *Food wastage footprint: Impacts on natural resources*. Organization of the United Nations. p.63. Italia, Roma. 2013.

FARIA, P.F. *Avaliação do desempenho ambiental do processo de reciclagem de poliolefinas utilizando as ferramentas produção mais limpa, análise envoltório de dados e análise SWOT*. (Tese de Doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Instituto de Macromoléculas Professora Eloisa Mano. Rio de Janeiro, 2011.

FEIJÓ, A.C.; ROSINDO, E.; DA COSTA, R.G.; MARUYAMA, U. Planejamento estratégico de PMES: um estudo de caso no segmento de reciclagem de plástico industrial no estado do Rio de Janeiro. XI Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia. Outubro, 2014.

FERNANDES, D.R. Uma visão sobre a análise da Matriz SWOT como ferramenta para elaboração da estratégia. UNOPAR Científica Ciências Jurídicas e Empresariais, Londrina, v.13, n.2, p. 57-68, 2012.

FERREIRA, B.O. Avaliação de um sistema de metanização de resíduos orgânicos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás. (Dissertação de Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais. 2015.

FERREIRA, J. S. Codigestão de Lodo de esgoto com Resíduos Urbanos e Industriais visando ao Aumento da Produção de Metano (Tese de doutorado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Rio de Janeiro, 2017.

FERRELL, O.C.; HARTLINES, M.D. Estratégia de Marketing. 5ª. ed. Santa Fe: Cengage Learning Editores S.A. de C.V., México D.F., México, 2012.

FGV- Fundação Getúlio Vargas. Boletim de Conjuntura do Setor Energético. Rio de Janeiro: FGV Energia, nº 4. p. 54, 2017.

FOLADORI, P.; ANDREOTTOLA, G.; ZIGLIO, G. Sludge Reduction Technologies in Wastewater Treatment Plants. IWA Publishing, Londres, 2010.

GADELHA, E.P. Avaliação de inóculos metanogênicos na aceleração do processo de degradação da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos (Dissertação) - Tecnologia ambiental e recursos hídricos. UNB, 2005.

GINESTET, P. (Ed.). Comparative evaluation of sludge reduction routes. Londres: IWA Publishing, 2007.

GIOVANELLI, A. Triple Bottom Line ou Tripé da Sustentabilidade. 2015. Disponível em: <<http://logisticareversa.org/2015/06/15/triple-bottom-line-ou-tripe-da-sustentabilidade/>>. Acesso em 03 de fevereiro de 2018.

GIZ & FACHVERBAND BIOGAS. Biogas Safety First: Diretrizes para o Uso Seguro da Tecnologia do Biogás. Associação Alemã de Biogás. Alemanha, 2016.

GÓMEZ, X.; CUETOS, M.J.; CARA, J.; MORÁN, A.; GARCIA, A.I. Anaerobic co-digestion of primary sludge and the fruit and vegetable fraction of the municipal solid wastes: Conditions for mixing and evaluation of the organic loading rate, Renewable Energy. v.3, p. 2017-2024. 2006.

GOTTFRIED, O.; DE CLERCQ, D.; BLAIR, E.; WENG, X.; WANG, C. SWOT-AHP-TOWS analysis of private investment behavior in the Chinese biogas sector. *Journal of Cleaner Production*. v.184, p. 632-647, 2018.

GOTTSCHALL, C.A.M. *Do mito ao Pensamento Científico: A Busca da Realidade, de Tales a Einstein*. São Paulo: Atheneu, 2004.

GUTIÉRREZ PULIDO, H.; DE LA VARA SALAZAR, R. *Análisis y diseño de experimentos*. 2ª ed. México DF: McGraw-Hill, 2008.

HEIDARZADEH, N.; GITIPOUR, S.; ABDOLI, M. A. Characterization of oily sludge from a Tehran oil refinery. *Waste Management & Research*. n. 28, p. 921-927, 2010.

HÍJAR, G. F. *Planeación estratégica: la visión prospectiva*. México: Limusa, 2014.

HITT, M.A.; IRELAND, D.; HOSKISSON, R.E. *Administración Estratégica: Competitividad y Globalización, Conceptos y Casos*. 11ª ed. Santa Fe: Cengage Learning Editores S.A. de C.V., México D.F., México, 2015.

HOLLIGER, C et al. Towards a standardization of biomethane potential tests. *Water Science and Technology*, 2016.

IEMA – Instituto de Energia e Meio Ambiente. *Documento de Análise: Emissões de GEE do setor de energia, processos industriais e uso de produtos*. 48p. 2016.

ITO, T; NAKASHIMADA, Y; SENBA, K; MATSUI, T; NISHIO, N. Hydrogen and ethanol production from glycerol-containing wastes discharged after biodiesel manufacturing process. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, v. 100, n. 3, p. 260–265, 2005.

JINGURA, R.M., MATENGAIFA, R. Optimization of biogas production by anaerobic digestion for sustainable energy development in Zimbabwe. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 13, p. 1116-1120, 2009.

JARAMILLO, I.R. *Fundamentos teórico-prácticos de temas selectos de la ciência del suelo*. Parte I. Universidad Autónoma Metropolitana, Mexico, 1996.

JERÔNIMO, C.E.M.; KITZINGER, W.G.C.M. Dimensionamento de um landfarming para tratamento de borras oleosas utilizando critérios de um reator batelada. *REGET*, v. 18, p.1273 - 1285, 2014.

JHONSON, G.; SCHOLE, K.; WHITTINGTON, R. *Dirección Estratégica*. Madrid: Pearson Education, S.A., 2006.

KACPRZAK, M. et al. Sewage sludge disposal strategies for sustainable development. *Environmental Research*, v. 156, n. January, p. 39–46, 2017.

KIM, H.W.; HAN, S.K.; SHIN, H.S. The optimization of food waste addition as a cosubstrate in anaerobic digestion of sewage sludge. *Waste Management Research*, v. 21, p. 515-526, 2003.

KIM, J.K., OH, B.R., CHUN, Y.N., KIM, S.W. Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, v. 102, p. 328-332, 2006.

KOTLER, P.; KELLER, K. L. *Administração de marketing*. 12. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2006.

KUNZ, A.; PERDOMO, C.C.; OLIVEIRA, P.A.V. de. *Biodigestores: Avanços e Retrocessos*. Concórdia: EMBRAPA - CNPSA, 2004.

LADISLAO, B. A. Environmental levels, toxicity and human exposure to tributyltin (TBT)-contaminated marine environment. A review. *Environment International*. n. 34, p. 292-308, 2008.

LANSING, S; BOTERO, R.B.; MARTIN, J. F. Waste treatment and biogas quality in small-scale agricultural digesters. *Bioresource Technology*, v. 99, p. 5881-5890, 2008.

LA ROVERE, E.L. *Política Ambiental e Planejamento Energético*. Rio de Janeiro: Programa de Planejamento Energético/COPPE/UFRJ, 2016.

LEITE, V.D.; BARROS, A.J.M.; MENEZES, J.M.C.; SOUSA, J.T.; LOPES, W.S. Codigestão anaeróbia de resíduos orgânicos. *Revista DAE (Edição especial)*, v. 65, n. 208, p. 35-46, 2017.

LEITE, V.D.; SOUSA, J.T.; LOPES, W.S.; HENRIQUE, I.N.; BARROS, A.J.M. Bioestabilização anaeróbia de resíduos sólidos orgânicos: aspectos quantitativos. *Revista Tecnológica*, v. 18, n. 2, p. 90 – 96, 2014.

LI, Y.; PARK, S.Y.; ZHU, J. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 15, p. 821-826, 2011.

LIN, J.; ZUO, J.; GAN, L.; LI, P.; LIU, F.; WANG, K.; CHEN, L.; GAN, H. Effects of mixture ratio on anaerobic co-digestion with fruit and vegetable waste and food waste of China. *Journal of Environmental Sciences*. v. 23, p. 1403–1408, 2011.

LIU, X., GAO, X., WANG, W., ZHENG, L., SUN, Y. Pilot-scale anaerobic co-digestion of municipal biomass waste: Focusing on biogas production and GHG reduction. *Renewable Energy*, v. 44, p. 463-468, 2012.

LOPES, W.S., LEITE, V.D., PRASAD, S. Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste. *Bioresource Technology*. v. 94, p. 261–266, 2004.

LOCH, P.; NARDI, A.C.; ROJO, A.C. Sustentabilidade como estratégia de competitividade no agronegócio: o caso de uma cooperativa agroindustrial no oeste do paraná. In: IV Congresso Brasileiro de Gestão em Negócios. Paraná, 2016.

LOWRY, O.H.; ROSEBROUGH, N.J.; LEWIS F.A.; RANDALL, R.J. Protein measurement with the folin phenol reagent. *Journal Biological Chemistry*. v. 193, p. 265-75, 1951.

LUZ (Planilhas Empresariais). Guia rápido: Análise SWOT. Planilha Matriz SWOT 3.0. 2013. Disponível em: <http://www.facped.com.br/arquivos/08.Ebook-GuiaRapidoAnaliseSWOT.pdf>. Acesso em 20 de fevereiro de 2019.

LUZ (Planilhas Empresariais). D vidas em produtos - Como   Calculado o  ndice de Favorabilidade  vila. 2018. Disponível em: <https://ajuda.luz.vc/article/126-como-e-calculado-o-indice-de-favorabilidade-avila>. Acesso em 24 de fevereiro de 2019.

MAJLESSI, M.; VAEZI, A.; RABORI, M. M. Strategic management of solid waste in Tehran: a case study in District n . 1. *Environmental Health Engineering and Management Journal*, v.2, n.2, p. 59–66, 2015.

MARIANO, J.B. Impactos Ambientais do Refino do Petróleo. 1  ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.

MATA-ALVAREZ, J., DOSTA, J., ROMERO-G IZA, 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.

MARCHEZI, T.T.B. Análise dos aspectos de sustentabilidade ambiental do setor de celulose e papel no brasil: tecnologias e práticas (Disserta o) - Universidade Federal de Viçosa, Programa de Pós-Gradua o do Mestrado Profissional em Tecnologia de Celulose e Papel, Viçosa, 2013.

MBULIGWE, S.E.; KASEVA, M.E. Assessment of industrial solid waste management and resource recovery practices in Tanzania. *Resources, Conservation and Recycling*. v. 47. p. 260-276, 2006.

MCCREADIE, K. A arte da guerra sun tzu: uma interpreta o em 52 ideias brilhantes. São Paulo: Globo, 2008.

METCALF e EDDY. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*. 4<sup>th</sup> Ed. McGraw-Hill, 2014.

MINDTOOLS. SWOT analysis discover new opportunities: manage and eliminate threats. 2011. Disponível em <[http://www.mindtools.com/pages/article/newTMC\\_05.htm](http://www.mindtools.com/pages/article/newTMC_05.htm)>. Acesso em: 18 de novembro de 2016.

MOLINO, A. Biomethane production by anaerobic digestion of organic waste. *Fuel*, v. 103, p. 1003-1009, 2013.

MONTEBELO, V. Gerenciamento de Resíduos Industriais. Apostila do Curso na QHSET Consultoria e Treinamento, 2016.

MONTGOMERY, D.C. Design and Analysis of Experiments. 5<sup>th</sup> ed. New York: John Wiley and Sons Inc., 2001.

MOREIRA, R. S. Análise situacional de cooperativas sociais: o caso da cooperativa dos amigos, catadores e recicladores de resíduos sólidos – UNIRENDA. *Revista de Administração de Roraima – UFRR*. 2 ed, v.2, p. 114 - 135, 2012.

MUCCIACITO, J.C. As boas práticas de incineração de resíduos. *Revista do meio filtrante*. 2014. Disponível em <<http://www.meiofiltrante.com.br/internas.asp?id=17574&link=noticias>>. Acesso em 10 de dezembro de 2018.

NIELFA, A.; CANO, R.; FDZ-POLANCO, M. Theoretical methane production generated by the co-digestion of organic fraction municipal solid waste and biological sludge. *Biotechnology Reports*, v.5, p. 14–21, 2015.

NUNES, D.A.D. Efeito da utilização de resíduos vegetais na biorremediação de um solo contaminado por borra oleosa do petróleo (Tese de Doutorado) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2018.

OCHARÁN, J.L.S. Avaliação da logística reversa pós-consumo para a reciclagem mecânica do poliestireno expandido (EPS) sob uma combinação das metodologias SWOT e AHP (Dissertação) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola Politécnica & Escola Química, Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Rio de Janeiro, 2017.

OWEN, W.F.; STUCKEY, D.C.; HEALY JR., B.; YOUNG, Y.; MCCARTY, L. Bioassay for monitoring biochemical methane potential and anaerobic toxicity. *Water Research*. v. 13. p. 485-492, 1979.

PATINVOH, R.J.; OSADOLOR, O.A.; CHANDOLIAS, K.; SÁRVÁRI HORVÁTH, I.; TAHERZADEH, M.J. Innovative pretreatment strategies for biogas production, *Bioresource Technology*. v. 224, p. 13-24, 2016.

PAUL, E.; LIU, Y. (Eds.) *Biological Sludge Minimization and Biomaterials/Bioenergy Recovery Technologies*. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc. 513f. 2012.

PAGÉS-DÍAZ, J., PEREDA REYES, I., LUNDIN, M., SÁRVÁRI HORVÁTH, I. Co-digestion of different waste mixtures from agro-industrial activities: Kinetic evaluation and synergetic effects. *Bioresource Technology*. v. 102, p. 10834-10840, 2011.

PERES, C. S.; SANCHEZ, C. R.; MATUMOTO, C.; SCHMIDELLET, W. Anaerobic biodegradability of the organic components of municipal solid waste. São Paulo, Brasil. Paper preprints. VI International Symposium of Anaerobic Digestion, p. 12-16, 1991.

PESSÔA, L.T.G. Metodologia de avaliação ambiental estratégica de organismo geneticamente modificado na agricultura (Tese de Doutorado) - Programa de Pós-graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2007.

PETROBRAS. Relatório de Sustentabilidade 2017. 2018. Disponível em: <http://www.investidorpetrobras.com.br/pt/relatorios-anuais/relato-integrado/sustentabilidade>. Acesso em: 23 de fevereiro de 2019.

PICANÇO, A. P. Influência da recirculação de percolado em sistemas de batelada de uma fase e híbrido na digestão da fração orgânica de resíduos sólidos urbanos (Tese de Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2004.

PORTER, M. Estratégia competitiva: técnicas de análise da indústria e da concorrência. Rio de Janeiro: Campus, 1986.

QUALHARINI, E. Notas de aula. Disciplina de Planejamento Estratégico da Gestão Ambiental. Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro. Aula ministrada em 10 de abril de 2014.

RAPOSO, F.; FERNANDEZ-CEGRI, V.; DE LA RUBIA, M.A.; BORJA, R.; BELINE, F.; CAVINATO, C. et al. Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. *Journal of Chemical Technology and Biotechnology*. v. 86. p. 1088–1098, 2011.

RAHARJO, S.; MATSUMOTO, T.; IHSAN, T.; RACHMAN, I.; GUSTIN, L. Community-based solid waste bank program for municipal solid waste management improvement in Indonesia: a case study of Padang city. *Journal of Material Cycles and Waste Management*. Published Online May, 2015.

RATHI, A.K.A. Evaluation of project-level environmental impact assessment and SWOT analysis of EIA process in India. *Environmental Impact Assessment Review*. v. 67. p. 31-39, 2017.

REIS, A. S. Tratamento de resíduos sólidos orgânicos em biodigestor anaeróbio (Dissertação) - Universidade Federal de Pernambuco, Núcleo de Tecnologia. Recife, 2012.

RIPLEY, L.E.; BOYLE, W.C.; CONVERSE, J.C. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digester of high-strength wastes. *Journal Water Pollution Control Federation*, v. 58, n. 5, p. 406-411, 1986.

RIZZO, A.C.L.; LEITE, S.G.F.; SORIANO, A.U.; SANTOS, R.L.C.; SOBRAL, L.G.S. Biorremediação de solos contaminados por petróleo: ênfase no uso de biorreatores. CETEM - Centro de Tecnologia Mineral. *Série Tecnologia Ambiental*, n° 37, 2006.

RODRIGUES, A. et al. Planejamento estratégico de uma empresa do ramo farmacêutico: um estudo de caso do município de Cantagalo – PR. In: *Seminário de Ensino, Pesquisa e Extensão da UFFS*, 2016.

SALIHOGU, G. Industrial hazardous waste management in Turkey: Current state of the field and primary challenges. *Journal of Hazardous Materials*. v. 177. p. 42-56, 2010.

SAMOLADA, M.C.; ZABANIOTOU, A.A. Comparative assesment of municipal sewage sludge incineration, gaseification and pyrolysis for a sustainable sludge-to-energy management in Greece. *Waste Management*. v. 34. p. 411–420, 2013.

SEN, B.; ARAVIND, J.; KANMANI, P.; LAY, C. State of the art and future concept of food waste fermentation to bioenergy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 53, p. 547-557, 2016.

SENA, J. L. De, et al. Análise estratégica do plano de gerenciamento integrado de resíduos sólidos do município de Pedras de Fogo – Paraíba. *Faculdade Internacional da Paraíba. Revista Ambiental* v.1, n. 2, p. 21-33, 2015.

SILVA, L.J. Gerenciamento de borras oleosas provenientes de refinaria de petróleo (Tese de Doutorado) - Escola de Química, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2013.

SILVA, M. S. Biodigestão anaeróbia no saneamento rural. Lavras: UFLA/FAEPE, 71p. (Textos Acadêmicos). 2001.

SILVA, W.R. Estudo cinético do processo de digestão anaeróbia de resíduos sólidos vegetais. Tese de Doutorado. Universidade Federal da Paraíba. 2009.

SILVEIRA, N.C. Codigestão de lodo de esgoto e fração orgânica de resíduo de restaurante (Dissertação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Rio de Janeiro, 2016.

SLAPER, T. F; HALL, T. J. The triple bottom line: What is it and how does it work? 2011. Disponível em: <http://www.ibrc.indiana.edu/ibr/2011/spring/article2.html>. Acesso em: 03 de fevereiro de 2018.

SOSNOWSKI, P.; WIECZOREK, A.; LEDAKOWICZ, S. Anaerobic co-digestion of sewage sludge and organic municipal solid wastes. *Advances in Environmental Research*, v. 7, 609-616. 2003.

SOUZA, M.E. Fatores que influenciam a digestão anaeróbia. *Revista DAE*. v. 44, p. 8894, 1984.

SZKLO, A.S.; MAGRINI, A. *Geopolítica e Gestão Ambiental de Petróleo*. Rio de Janeiro: Interciência, 2008.

TA INSTRUMENTS. *Thermal advantage universal analysis operator's manual*. TGA Q-500. New Castle, 2002.

TEGHAMMAR, A., CASTILLO, M.D.P., ASCUE, J., NIKLASSON, C., SÁRVÁRI HORVÁTH, I. Improved anaerobic digestion by the addition of paper tube residuals: pretreatment, stabilizing, and synergetic effects. *Energy Fuels*. v. 27, p. 277-284, 2013.

TELLES, D.D.; COSTA, R.H.P.G.; *Reúso da água: conceitos, teorias e práticas*. 2 ed. São Paulo: Blucher, 2010.

THI, N.B.D.; LIN, C.; KUMAR, G. Waste- to-wealth for valorization of food waste to hydrogen and methane towards creating a sustainable ideal source of bioenergy. *Journal of Cleaner Production*. v. 122. p. 29-41, 2016.

THOMAS, J.E. *Fundamentos de Engenharia de Petróleo*. 2ª ed. Rio de Janeiro: Interciência: PETROBRAS, 2004.

THOMPSON, M. (Ed.) *CHNS Elemental Analysers*. AMC Technical Briefs. The Royal Society of Chemistry, 2008.

UNEP. *Global Environment Outlook 3 – Past, present and future perspectives*. London, UK: Earthscan Publication Ltd, 2002.

VALLERO, M.V.G.; HULSHOFF POL, L.W.; LETTINGA, G.; LENS, P.N.L. Effect of NaCl on thermophilic (55°C) methanol degradation in sulfate reducing granular sludge reactors. *Water Research*, v. 37, n.10, p. 2269–2280, 2003.

VELHO, S.R.K.; SIMONETTI, M.L.; SOUZA, C.R.P.; IKEGAMI, M.Y. Nível de maturidade tecnológica: uma sistemática para ordenar tecnologias. *Parcerias Estratégicas*. Brasília, v. 22, n. 45, p. 119-140, 2017.

VON SPERLING, M. *Lodos Ativados*. 2ª Ed., 4ª Reimpressão, Editora UFMG, Belo Horizonte, 2002.

WANG, H.; WANG, H.; LU, W.; ZHAO, Y. Digestibility improvement of sorted waste with alkaline hydrothermal pretreatment. *Tsinghua Science and Technology*, v. 14, p. 378-382. 2009.

WCED - World Commission on Environment and Development. *Our Common Future*. Oxford and New York: Oxford University Press, 1987.

WRIGHT, P.L.; KROLL, M.J.; PARNELL, J. *Administração Estratégica: Conceitos*. São Paulo: Atlas, 2009.

XINGANG, Z.; JIAOLI, K.; BEI, L. Focus on the development of shale gas in China - Based on SWOT analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. v. 21. p. 603–613, 2013

YUAN, H. A SWOT analysis of successful construction waste management. *Journal of Cleaner Production*. v. 39. p. 1-8, 2013.

ZESHAN, O.; KARTHIKEYAN, O.P., VISVANATHAN, C. Effect of C/N ratio and ammonia-N accumulation in a pilot-scale thermophilic dry anaerobic digester. *Bioresource Technology*. v. 113, p. 294- 302, 2012.

ZHAO, Z.; YAN, H. Assessment of the biomass power generation industry in China. *Renewable Energy*. v. 37. p. 53–60, 2012.