

**ESTUDO COMPARATIVO DE FONTES ENERGÉTICAS PARA SECAGEM
TÉRMICA DE LODO, UTILIZANDO: COMPLEMENTAÇÃO DO BIOGÁS COM
GÁS NATURAL (GN) OU RETROALIMENTAÇÃO COM O GÁS DE SÍNTESE
PRODUZIDO VIA GASEIFICAÇÃO A PLASMA DO LODO SECO**

Eloisa Helena Cherbakian⁽¹⁾

Graduada em Engenharia Química pela Faculdade de Engenharia Industrial (FEI), MBA em Administração pelo Instituto Mauá, Especialista em Engenharia de Petróleo e Gás pela UNISANTA e Mestre em Engenharia Sanitária pela Escola Politécnica da USP. Em sua trajetória profissional destaca-se a atuação como Gerente de Controle Sanitário, Gerente de Operação nas Estações de Tratamento de Esgotos Suzano e ABC, Coordenadora de Riscos Ambientais e Engenheira na área de Pesquisa e Inovação da Cia de Saneamento - Sabesp.

Antônio Sérgio Chaves Ferreira⁽²⁾

Graduando em Engenharia Civil pela Universidade Cruzeiro do Sul (UNICSUL), Técnico em Eletrotécnica pela ETEC Getúlio Vargas. Em sua trajetória profissional atuou como encarregado de manutenção na Estação de Tratamento de Esgotos São Miguel e no Departamento de Interceptação e Sistemas Isolados da RMSP, no Departamento de Engenharia da Unidade de Tratamento de Esgotos da Cia de Saneamento - Sabesp, onde instalou, acompanhou e desenvolveu o sistema gaseificação de lodo por plasma.

Marcio Hideaki Fujii⁽³⁾

Graduado em Engenharia Mecânica pela Faculdade de Engenharia Mauá. Em sua trajetória profissional destaca-se a atuação como Engenheiro de Manutenção Eletromecânica de estações de tratamento de esgotos e Engenheiro do Departamento de Engenharia da Superintendência de Tratamento de Esgotos da Metropolitana e da Superintendência de Pesquisa e Inovação da Cia de Saneamento - Sabesp e Supervisor de Implantação do Projeto do Sistema de Tratamento de Água de Reuso da Aquapolo Ambiental.

Lidia Harumi Endo⁽⁴⁾

Engenheira Sanitarista pela Escola de Engenharia Mauá. Pós-graduação Especialização em Gestão Ambiental pela Faculdade de Saúde Pública da USP. MBA em Saneamento Ambiental, pela FESPSP. Atuou durante os últimos anos como: Engenheira da área de projetos e licenciamento ambiental da EPASC do Grupo EPA Engenharia de Proteção Ambiental; Engenheira de Saúde Pública na FUNASA – Fundação Nacional de Saúde e Engenheira do Departamento de Inovação Tecnológica e Propriedade Intelectual da Sabesp.

Endereço: Rua Nicolau Gagliardi, 313 – Pinheiros – São Paulo / SP – CEP: 05429-010 – Brasil – Tel: +55 (11) 3388-8080 – e-mail: ehcherbakian@sabesp.com.br.

RESUMO

Visando explorar alternativas sustentáveis para o lodo, como sua conversão termoquímica em energia, ou minimamente redução do lodo disposto em aterros, ampliando vida útil e reduzindo emissões de gás de efeito estufa (GEE) nos mesmos, além de ampliar a adoção da economia circular em ETEs, o presente estudo buscou apresentar de forma bastante simplificada, uma comparação entre duas alternativas de fonte energética para a realização da secagem térmica do lodo de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE), utilizando-se a ETE Franca como referência. Como fontes energéticas, além do biogás excedente gerado na planta (dos digestores anaeróbios), foram avaliadas a complementação com a aquisição de gás natural (GN) e uso de gerador de vapor, ou a utilização do lodo seco a 90% ST da própria ETE como combustível (gaseificado a plasma) para suprir a energia necessária à sua secagem, garantindo minimamente a autossuficiência energética do sistema ou até a possibilidade de comercialização do gás de síntese gerado (na forma de biometano). Com base em balanços simplificados, as alternativas que consideraram gaseificação total dos lodos com comercialização do gás gerado, seguidas pelas alternativas de gaseificação parcial, com aproveitamento agrícola dos lodos secos, apresentaram os menores prazos de retorno de investimento.

PALAVRAS-CHAVE: Secagem Térmica de Lodo, Gaseificação de Lodo de Esgoto.

INTRODUÇÃO

O lodo gerado por Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) é classificado como resíduo e no Brasil, normalmente o lodo é tratado (estabilização, condicionamento físico-químico e desaguamento) e depositado em aterros sanitários, ou transformado no que é chamado de biossólido, que pode, após processamento adequado, ser aplicado no solo, utilizado como condicionante de solo ou fertilizante (composto orgânico) a depender do tratamento recebido.

Como o lodo é um material de origem orgânica, há uma gama de possibilidades de sua reutilização, seja na agricultura, em recuperação de solos, em indústria cimenteira, como agregado leve na construção civil entre outros usos, como o aproveitamento energético. Surge então, uma demanda por estudo de tecnologias e processos que permitam a sua conversão termoquímica em energia, seja por meio de processos biológicos, como por exemplo, a biodigestão anaeróbia gerando o biogás, ou por meio de processos termoquímicos, como a pirólise, gaseificação e combustão. O lodo de esgoto pode assim, ser considerado uma importante matéria-prima para esses processos termoquímicos, os quais permitem a redução do volume de lodo e a produção de energia para diversos usos (FULLANA et al., 2003; FYTILI; ZABANIOTOU, 2008; TRINH et al., 2013 *apud* ROSA et al., 2015).

Como já exposto, a biodigestão é um processo que tem como finalidade a estabilização ou mineralização do lodo com produção de biogás, que é um gás composto majoritariamente por metano seguido de dióxido de carbono. Esse tipo de processo é atualmente utilizado na ETE Franca, localizada no município de mesmo nome no estado de São Paulo e que será utilizada como referência no presente estudo. Assim, os dados médios da ETE serão utilizados nos cálculos estimativos, como a produção de cerca de 2960 Nm³/d de biogás em biodigestores anaeróbios de lodo, com teor de metano de aproximadamente 70% (podendo variar de 65% a 70%). Na ETE, o lodo digerido é então condicionado quimicamente com polímero catiônico e desaguado em prensa desaguadora, gerando um resíduo com cerca de 20% de sólidos. Após secagem complementar em estufa solar, o lodo é encaminhado para aterro sanitário. A ETE gera atualmente, cerca de 90 t/d de lodo úmido e vem há tempos buscando alternativas para uso benéfico desse lodo evitando ao máximo seu envio a aterros sanitários.

Em paralelo, a progressiva preocupação com os adventos das mudanças climáticas e consequente necessidade premente de se conter as emissões de gases de efeito estufa (GEE) em contraponto com o crescimento e expansão do consumo de combustíveis não renováveis e aumento da produção de resíduos ocasionados pelo crescimento da população global e das atividades produtivas, geram a necessidade de pesquisa e desenvolvimento de novos processos e tecnologias que sejam capazes de promover o desenvolvimento de forma sustentável. A redução das emissões de poluentes e a gestão de resíduos sólidos são alguns dos desafios ainda a serem transpostos para mitigar o impacto ocasionado ao meio ambiente. Ainda no contexto da economia circular, a seleção adequada da tecnologia mais promissora para o processamento de resíduos não deve apenas levar em consideração critérios como eficiência energética, mas também a relação custo-benefício associada à possibilidade de recuperação de nutrientes (por exemplo, N e P) contidos nos mesmos e na gestão sustentável dos sólidos resultantes (por exemplo, biocarvão e cinzas ou vidro, sílica e carbono sólido entre outros) decorrentes dos diferentes tipos de processos térmicos (MIGLIACCIO et al., 2021).

Isto posto, verifica-se crescente interesse na aplicação de processos termoquímicos a diferentes tipos de resíduos, considerando o impacto ambiental desses materiais e aspectos econômicos do processo. A incineração e a gaseificação do insumo se mostram como alternativas interessantes a serem estudadas, visto que, se efetuadas corretamente, a geração de poluentes é reduzida, principalmente se for utilizado um sistema adequado de filtragem e limpeza dos gases produzidos no processo. A incineração, entretanto, necessita de um excesso de ar para a combustão de resíduos sólidos, o que faz com que esse tipo de processo tenda a produzir menor eficiência quando comparada com a gaseificação. Além disso, as temperaturas da incineração são mais altas do que da gaseificação, o que faz com que a presença de umidade no insumo diminua ainda mais a eficiência do processo (FUNDUNESP, 2020). A gaseificação é então, uma tecnologia que se mostra viável para a conversão termoquímica de biomassa e resíduos, dada sua esperada maior sustentabilidade ambiental.

Outra diferença entre os processos termoquímicos de gaseificação e combustão é que a gaseificação armazena energia nas ligações químicas no gás produzido e a combustão quebra essas ligações para liberar a energia. O processo de gaseificação adiciona hidrogênio e remove o carbono da matéria-prima para produzir gases com uma alta razão de hidrogênio para carbono (H/C), enquanto a combustão oxida o hidrogênio e o carbono em água e dióxido de carbono, respectivamente, ou seja, na gaseificação, tem-se como resultado as cinzas e um gás combustível (FUNDUNESP, 2020).

A gaseificação se caracteriza pela reação termoquímica de oxidação parcial dos insumos com finalidade de produção de um gás combustível, comumente chamado de *syngas* ou gás de síntese. Esse gás pode ser queimado com finalidade de geração de energia ou de calor para processos, não havendo a necessidade de energia externa para a reação se manter, mas tão somente para sua ignição inicial. Assim, é uma tecnologia que tem sido estudada como uma alternativa promissora que permite maior eficiência de conversão de resíduos em gases combustíveis (FUNDUNESP, 2020).

Outra vantagem de se utilizar a gaseificação é o fato de que ela pode trabalhar com diversos tipos de resíduos de composição variável, sendo uma técnica de conversão de energia conhecida e comumente aplicada à biomassa, utilizando diferentes tipos de reatores e agentes de gaseificação (OKAMURA et al., 2013). Além disso, a depender do tipo de gaseificador utilizado, o sistema pode ser implantado de forma modular. Como já exposto, o produto da gaseificação é um gás combustível capaz de ser utilizado para produção de energia térmica para conversão em calor ou eletricidade (DA SILVA et al., 2020; OKAMURA et al., 2013).

Existem diversas tecnologias de gaseificação, sendo a principal classificação atribuída à divisão entre reatores de leito fixo e de leito fluidizado, entretanto já existem os gaseificadores a plasma. Reatores de leitos fluidizados são frequentemente escolhidos como referência por fatores como (ZACCARIELLO and MASTELLONE, 2015 *apud* FUNDUNESP, 2020b):

- grande flexibilidade operacional;
- boa capacidade de mistura, que garante condições uniformes de processamento;
- capacidade de operar com diferentes insumos (combustíveis);
- a possibilidade de utilizar diferentes agentes de fluidização e
- possibilidade de projetar a alimentação do combustível em diferentes posições do reator.

O poder calorífico superior do lodo de ETE seco é da ordem de 17 MJ/kg para lodo primário, 15 MJ/kg para lodo ativado e 11 MJ/kg para um lodo digerido por processos aeróbios, anaeróbios ou pelo uso de cal (WERLE and WILK, 2010 *apud* FUNDUNESP, 2020b; OLIVEIRA SILVA, 2011). Embora a digestão anaeróbia seja compatível com a gaseificação, não é preferida como etapa de pré-tratamento, pois grande parte da energia química dos lodos é removida ficando indisponível para recuperação no gás de síntese. O lodo desaguado em ETE em geral contém apenas 20-30% de material sólido, o que também reduz consideravelmente seu poder calorífico.

Como já exposto, a ETE Franca, possui digestão anaeróbia de lodos com produção de biogás e esta será mantida, principalmente porque parte desse biogás é beneficiado para biometano, atualmente utilizado no abastecimento de veículos a gás da própria Sabesp.

A Resolução SIMA 47/2020 versa sobre o uso energético dos resíduos, definindo a gaseificação como combustão parcial de substâncias orgânicas, na presença de oxigênio, com temperatura entre 500 a 1.000 °C e com produção de gases que podem ser usados como combustível (gás de síntese).

Os processos termoquímicos de gaseificação, pirólise e a carbonização (conhecida como um processo de pirólise lenta), podem ser consideradas variações de um mesmo processo (GÓMEZ et al., 2008 *apud* SANTOS, Y.B.I, 2012), sendo que a gaseificação trabalha com temperaturas mais elevadas e a uma baixa concentração de oxigênio (sub estequiométrico). Cada um dos três modos de pirólise visa maximizar um só produto, a carbonização maximiza o carvão, a pirólise rápida maximiza os líquidos (bioóleo) e a gaseificação, os gases combustíveis, cada um com suas imediatas aplicações (SANTOS, Y.B.I, 2012). Os processos de gaseificação de biomassa são compostos de reações endotérmicas e exotérmicas, sucessivas e repetitivas que em geral, se desenvolvem em cinco estágios (HAYKIRI-ACMA e YAMAN, 2007 *apud* VIRMOND, 2007; FUNDUNESP, 2020b), precedidos por processos preliminares como a desumidificação e secagem: devolatilização inicial ou pirólise; combustão de voláteis; combustão do resíduo sólido; gaseificação do resíduo sólido e reações em fase gasosa, ou resumidamente:

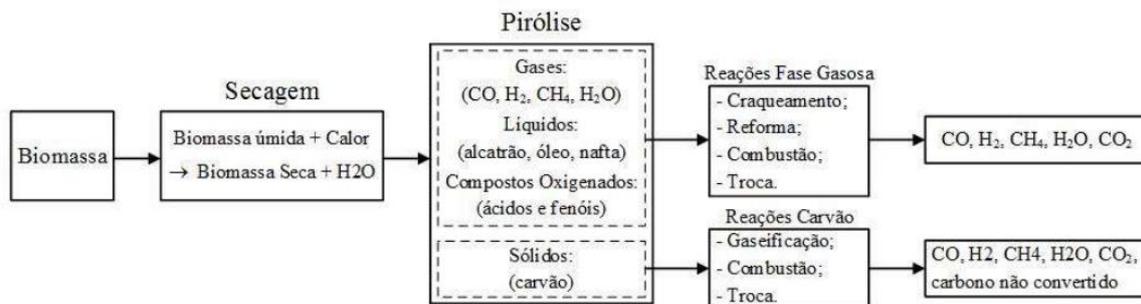
- ✓ Secagem.
- ✓ Decomposição térmica ou pirólise.
- ✓ Combustão parcial de alguns gases, vapores e carvão.
- ✓ Gaseificação de produtos de decomposição.

A figura 1 apresenta um esquemático do processo. A umidade contida na biomassa requer uma energia extra do processo de gaseificação para vaporização da água, sendo que cada quilo de umidade requer, ao menos, 2.260 kJ de

energia, razão pela qual é necessário um processo de pré secagem capaz de remover o máximo possível de umidade da biomassa antes que ela seja alimentada no gaseificador. Para a produção de um gás combustível com um poder calorífico razoavelmente alto, o processo de gaseificação deverá utilizar uma biomassa seca (neste caso, o lodo de ETE) com um teor de umidade entre 10 ao máximo de 20% (BASU, 2010 *apud* FUNDUNESP, 2020b).

Uma observação relevante refere-se ao processo de secagem, onde é recomendada a manutenção da temperatura de secagem tão baixa quanto o possível, entre 110°C e 165°C, para minimizar as perdas de voláteis, os quais são responsáveis pela produção do gás combustível (*syngas*) em estágio posterior (FURNESS et al., 2000 *apud* PARODI e SANCHEZ, 2002), que no presente estudo, será uma das alternativas de fonte energética para a secagem do lodo.

Figura 1 - Principais reações do processo de gaseificação de biomassa



Fonte: FUNDUNESP, 2020c.

Outra vantagem da gaseificação sobre os tradicionais processos de incineração, é que este processo emprega sistemas para limpeza de gases com equipamentos de dimensões menores, e com operações mais simples, devido à emissão menor de resíduos (SANTOS, Y.B.I, 2012), ou seja, além de ser um processo de obtenção de energia também é um processo de destruição de resíduos e se torna bastante interessante para destruição de grande parte dos resíduos perigosos, como resíduos hospitalares entre outros (OKAMURA et al., 2013).

OBJETIVO

Apresentar de forma bastante simplificada e com base em balanço energético e estudo de viabilidade econômica, uma comparação entre duas alternativas de fonte energética para a realização da secagem térmica do lodo de uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) por lodos ativados adotando como referência no presente estudo, a ETE Franca. Para as fontes energéticas em estudo (complementação do biogás excedente da ETE com GN ou gaseificação do lodo seco com geração de gás de síntese a retroalimentar o secador), foram considerados quatro cenários com diferentes alternativas de destinação dos respectivos subprodutos gerados.

FONTES DE ENERGIA PARA A SECAGEM DO LODO NA ETE

Como já exposto, existem diferentes tipos de gaseificadores, destacando-se os de leito fixo (e suas variantes) ou fluidizado, além do gaseificador a plasma. Basicamente, o gaseificador de leito fixo pode ser contracorrente, concorrente ou de fluxo cruzado, enquanto os de leito fluidizado são classificados como borbulhantes ou circulantes (WARNECKE, 2000 *apud* OLIVEIRA, SILVA e SILVA, 2017).

O poder calorífico do *syngas* varia conforme o agente de gaseificação, por exemplo, ao utilizar-se ar, o valor pode chegar a 3-5 MJ/Nm³, e utilizando-se oxigênio ou vapor, o poder calorífico fica na faixa de 10-18 MJ/Nm³ (LAPUERTA et al., 2008 *apud* PAULINO, 2021). A desvantagem da gaseificação, no caso de gaseificador de leito fluidizado, é que usam temperaturas relativamente baixas para evitar a aglomeração e sinterização de cinzas no leito durante o processamento. Com isso, o gás produzido neste tipo de gaseificador tem em sua composição alcatrões e outras espécies orgânicas condensáveis que criam obstáculos no processo e exigem as técnicas custosas e complexas para serem removidas (PAULINO, 2021). Além disso, as cinzas geradas neste tipo de gaseificador podem conter altos níveis de carbono fixo, metais pesados e poluentes orgânicos que reduzem a eficiência de conversão do processo

e limitam o uso secundário (MATERAZZI, 2016 *apud* PAULINO, 2021). Tais desvantagens podem ser limitantes para o uso desta tecnologia no processamento de resíduos sólidos, como lodos, por exemplo.

O plasma é uma matéria ionizada de alta temperatura que inclui elétrons, partículas neutras além de íons, sendo definido como o quarto estado da matéria e que pode ser considerado eletricamente neutro (PAULINO, 2021). É criado pela ionização de um gás de trabalho por onde flui uma corrente elétrica (CC ou CA). As moléculas de gás colidem com carga de elétrons criando partículas carregadas tanto positivamente quanto negativamente. O gás começa a conduzir eletricidade e as colisões entre partículas carregadas ocorrem liberando calor e formando um arco de luz que é chamado de plasma (PAULINO, 2021). O plasma tanto pode ser utilizado como fonte de calor durante a gaseificação, quanto pode ser usado para quebrar o alcatrão após gaseificação convencional (SIKARWAR et. al, 2016 *apud* PAULINO, 2021).

Devido à alta temperatura do plasma, os componentes inorgânicos dos materiais tratados são fundidos, os componentes orgânicos são volatilizados e moléculas complexas são dissociadas, permitindo destruir todos os resíduos que contenham substâncias nocivas (ZHOVTYANSKY e VALINCIUS, 2018 *apud* PAULINO, 2021). Os inorgânicos fundidos são removidos do reator e após o resfriamento e a solidificação produzem uma substância semelhante à escória. Materiais orgânicos, contendo principalmente carbono, hidrogênio e oxigênio ligados quimicamente, são decompostos em *syngas* que pode ser utilizado como combustível de alta qualidade ou na indústria química (HRABOVSKY e VAN DER WALT, 2017 *apud* PAULINO, 2021). O *syngas* oriundo da gaseificação a plasma pode ser convertido em grande variedade de produtos energéticos, incluindo: eletricidade, através de turbinas a gás, motores alternativos e células de combustível; calor e vapor.

Deste modo, mesmo sendo uma tecnologia considerada ainda em desenvolvimento e relativamente com elevado consumo de energia elétrica e de eletrodos (necessita de melhorias tecnológicas devido a esse consumo e ainda por apresentar muitas perdas concentradas no gaseificador, segundo PAULINO, 2021), no presente estudo será adotada a gaseificação a plasma nos cálculos estimativos para comparação com o uso de gás natural e gerador de vapor na secagem do lodo. Tal escolha se deve ao fato do elevado custo do gaseificador convencional (praticamente 2,5 vezes superior ao do gaseificador a plasma), aliado à geração de *syngas* mais limpo e de poder calorífico muito superior ao produzido em gaseificadores convencionais que por sua vez, geram um volume razoável de cinzas as quais podem ou não conter metais pesados e assim não serem consideradas resíduos “não inertes” (classe IIA), diferentemente dos sólidos resultantes no plasma que são inertes (classe 2B).

A ETE Franca trata atualmente a média de 550 L/s de esgoto, gerando cerca de 2968 Nm³/d de biogás a 70% de metano e 90 t/d de lodo úmido (média de 20% de sólidos) que atualmente passa por desumidificação adicional em leito de secagem (estufa solar) e transporte e disposição em aterro sanitário. Parte do biogás (de 187 a 280 Nm³/d) é purificado e convertido a biometano em um processo de beneficiamento, sendo utilizado no abastecimento de veículos da companhia como gás veicular.

Seguindo a norma brasileira ABNT NBR 10004:2004, o lodo atualmente gerado na ETE Franca é classe II A (não inerte), o que restringe sua aplicação direta no solo sem um tratamento adicional como compostagem, entre outros.

Visando ampliar a adoção da economia circular em ETEs, além de buscar-se um uso mais sustentável para o lodo gerado ou minimamente reduzir o volume e umidade do lodo disposto poupando-se a vida útil de aterros sanitários e reduzindo emissões de gás de efeito estufa (GEE), o presente estudo buscará comparar através de estimativa de balanço energético e avaliação de viabilidade econômica, duas diferentes fontes de energia para eventual secagem térmica do lodo.

Assim, para realizar o balanço, foram comparadas a complementação energética para secagem do lodo utilizando-se:

- uma mistura de biogás excedente produzido na ETE (que não está sendo beneficiado para abastecimento de veículos) e de gás Natural (GN) a ser adquirido;
- uma mistura de biogás excedente e o gás de síntese gerado a partir da gaseificação de parte do lodo seco, de modo a garantir a energia necessária à secagem térmica (considerando a implantação de sistema de gaseificação para o lodo seco a 90% de sólidos, ou seja, a gaseificação do lodo seco produzirá o gás de síntese que será fonte de energia para o secador térmico, havendo necessidade de energia externa apenas para ignição inicial);

- ou ainda, através da utilização apenas do gás de síntese, nesse caso, gaseificando-se todo o lodo seco, gerando excesso de gás de síntese que pode ser beneficiado e comercializado juntamente com o biogás excedente (como biometano).

METODOLOGIA – ESTIMATIVAS DO BALANÇO ENERGÉTICO

A partir dos dados de lodo desaguado gerado, teor de sólidos inicial e final desejado, bem como do volume diário e características do biogás atualmente produzido, foram estimados os consumos e custos de duas diferentes fontes complementares de energia para a secagem térmica do lodo na ETE Franca.

Pela análise dos resultados, objetiva-se comparar as eficiências e autossuficiências dos sistemas estudados, além das viabilidades econômicas das alternativas, conforme balanço estimativo que considera as hipóteses de complementação da energia gerada pelo biogás excedente existente na planta (oriundo dos digestores anaeróbios), com:

- ✓ a aquisição de gás natural (GN), ou
- ✓ utilização do lodo seco a 90% ST da própria ETE Franca como combustível (via gaseificação a plasma) para suprir a energia necessária à sua secagem, garantindo minimamente a autossuficiência energética do sistema.

As informações necessárias para a realização dos balanços de massa e energia são as propriedades intensivas e extensivas do fluxo de matéria e energia que atravessam as fronteiras de cada um dos equipamentos considerados na análise. A delimitação da fronteira considerada é denominada “volume de controle”. Cabe lembrar a importância de manter o teor de umidade, presente no lodo da ETE, abaixo de 20% para que o processo de gaseificação possa ocorrer, sendo que para a presente simulação, foi considerada a secagem do lodo a 90% de sólidos.

Quanto ao poder calorífico inferior para a composição média do GN fornecido por concessionárias, embora formalmente seja de 8.364 a 9.160 kcal/Nm³ (Manual - Gás Brasileiro, V.1), para fins de cálculos será considerado o valor de PCI de 8.600 kcal/Nm³ (Ecoverden, 2023).

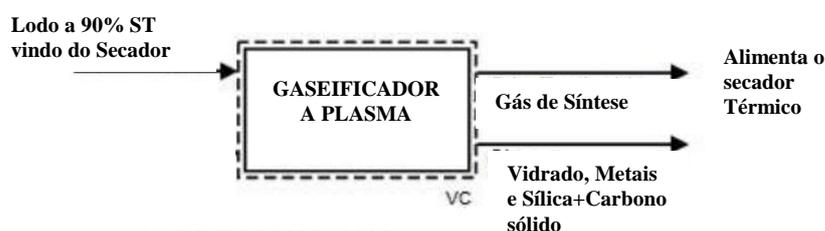
Os custos de investimento do subsistema avaliado (gaseificação), foram estimados com base em adaptações a orçamentos preliminares (CAPEX). Para o OPEX foram calculados os insumos energia elétrica e consumo de eletrodos de grafite (base em resultados de planta piloto). Para as demais despesas, como mão de obra para operação e manutenção dos sistemas de gaseificação ou de geração de vapor, além de peças de reposição e demais materiais de consumo, foi adotado o valor anual de 5% sobre o valor do respectivo CAPEX. Como o objetivo do estudo é o de comparar duas opções de rotas tecnológicas para o fornecimento de energia necessária à secagem térmica do lodo, não foram considerados custos de depreciação.

Balanço de massa e energia no gaseificador

O gaseificador é um reator auto térmico, ou seja, a energia que entra no sistema será gerada pelo lodo que sai do secador térmico a 10% de umidade e que será o combustível da reação. Dessa forma é necessário o fornecimento de energia para a partida do equipamento, por meio de um queimador a gás, até o processo estabilizar.

Na Figura 2 é apresentado o volume de controle de um gaseificador, indicando os fluxos de matéria pelas fronteiras do sistema.

Figura 2 - Representação dos fluxos de entrada e saída do gaseificador a plasma



Fonte: Adaptado de FUNDUNESP, 2020c.

Como já exposto, para a secagem térmica do lodo na ETE Franca foram consideradas duas diferentes alternativas de energia. E vale destacar que das 90 t/d de lodo geradas na ETE a 20% de sólidos totais (ST), assumiu-se que 20 t/d seriam encaminhados para secagem em “estufa à energia solar”, com o objetivo de atingir-se minimamente 70% de ST (teor adotado de forma conservadora, a exceção do cenário C, onde foi admitida a secagem a 90% ST).

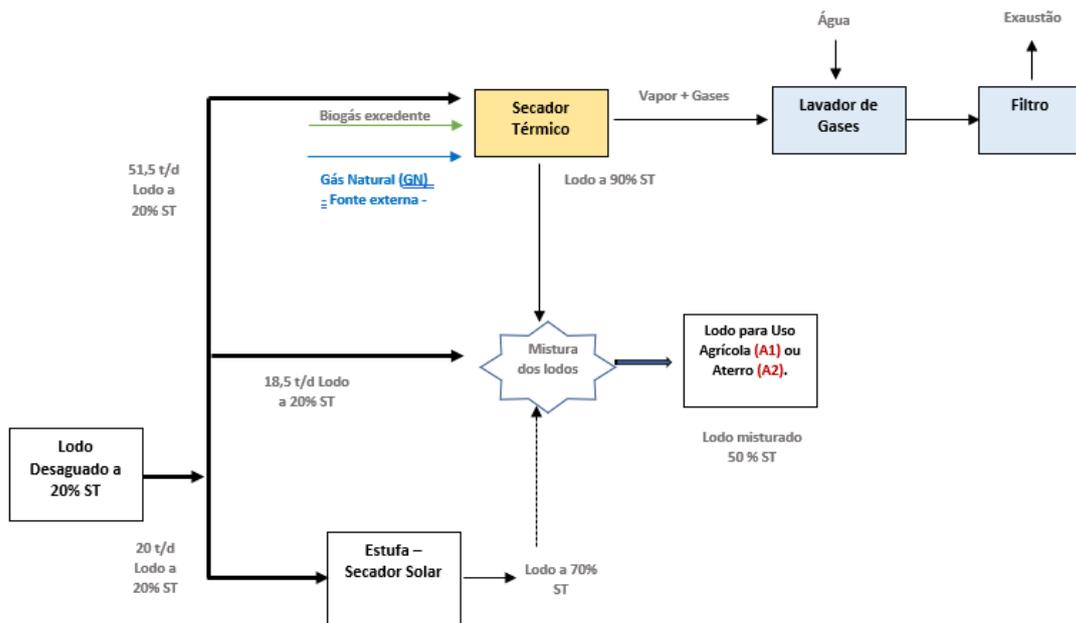
Para as demais 70 t/d foram estimadas as seguintes alternativas:

- **Cenário A:** Cerca de 51,5 t/d de lodo a 20% ST encaminhados para secagem térmica para obtenção de lodo seco a 90% de sólidos. Esse lodo seco seria misturado com o restante do lodo a 20%ST (cerca de 18,5 t/d) que não passou por secagem térmica, e com o lodo da estufa solar (consideraremos seco a 70%ST), resultando em 35,7 toneladas diárias de lodo a 50% para uso agrícola ou, na pior hipótese, disposição desse volume reduzido em aterro sanitário. Como fonte de energia, nesse caso o secador utilizaria o biogás excedente (dos biodigestores anaeróbios) e a energia complementar seria obtida com a aquisição de gás natural (GN), conforme ilustrado na figura 3.
- **Cenário B:** As 70 t/d de lodo a 20% ST seriam enviadas para secagem térmica até atingir 70 %ST e depois misturada com o lodo da Estufa também a 70% ST. As 25,7 t/d de lodos resultantes (70% de sólidos) poderiam ser aplicadas na agricultura ou, na pior hipótese, dispostos em aterro sanitário, com redução na massa e volume transportados (figura 4).
- **Cenário C:** Nesse cenário, a energia para a secagem do lodo seria obtida da Gaseificação a Plasma de todo o lodo seco (tanto na estufa quanto no secador térmico). Neste cenário, não seria necessário utilizar o biogás excedente do abastecimento da frota, pois seria produzida uma quantidade de energia superior à energia necessária para a secagem (energia total do gás de síntese na forma de biometano). Ainda há a possibilidade de aproveitamento dos sólidos resultantes (recuperação de metais, vidro, sílica volatilizada pelo plasma e carbono sólido) e de comercialização dos gases de síntese e biogás excedente (figura 5), ou, na pior das hipóteses, destinação dos sólidos resultantes (volume sensivelmente menor) para aterro de inertes.
- **Cenário D:** Neste cenário utilizaríamos somente uma parte do lodo como combustível (gaseificação a plasma) para, juntamente com o biogás excedente dos biodigestores, garantir a secagem de lodo (67,9 t/d), de forma a não necessitar de aquisição de combustível auxiliar. Nesse caso, além da possibilidade de aproveitamento dos sólidos resultantes na saída do gaseificador (recuperação de metais, vidro e sílica volatilizada pelo Plasma e carbono sólido), ter-se-ia 13,2 t/d de uma mistura de lodo (média de 70% ST) com viabilidade para uso agrícola (ver figura 6). Na pior das hipóteses, os sólidos resultantes e os lodos poderiam ser encaminhados ao aterro de inertes e sanitário, respectivamente.

Nas figuras 3 a 6 são apresentados os esquemáticos para os cenários e alternativas “A” a “D” acima, lembrando que em “C” e “D” o lodo seco a 90% de sólidos (10% de umidade) vindo do secador térmico é introduzido no gaseificador e o calor fornecido pelo plasma volatiliza a parte orgânica do lodo gerando um gás combustível. Este gás combustível (gás de síntese) será utilizado juntamente ou não, com o biogás dos digestores (excedente) como fonte de energia para a secagem do lodo e a sobra energética verificada no cenário C, disponibilizada para comercialização na forma de biometano.

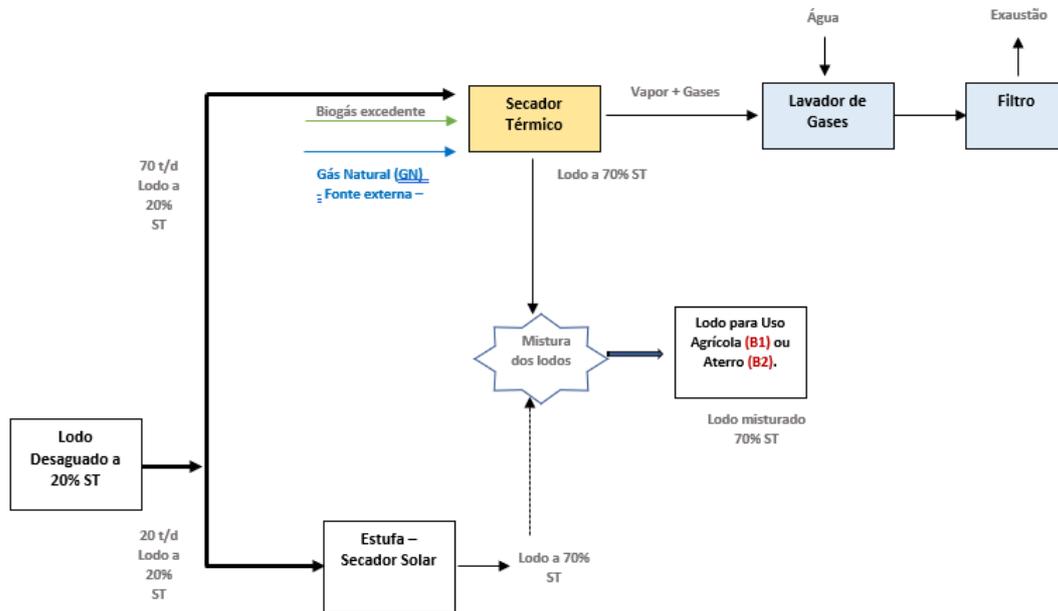
Outra observação refere-se à expectativa de que o “calor” gerado no plasma deva suprir parte da energia necessária ao secador térmico reduzindo o consumo de combustível complementar, entretanto, de forma conservadora, esta fonte não foi considerada no presente balanço.

Figura 3: Cenário “A” – Uso de Biogás excedente da ETE e compra de GN para secagem térmica do lodo, com as alternativas de uso agrícola (A1) ou destinação do lodo a 50% ST a Aterro Sanitário (A2).



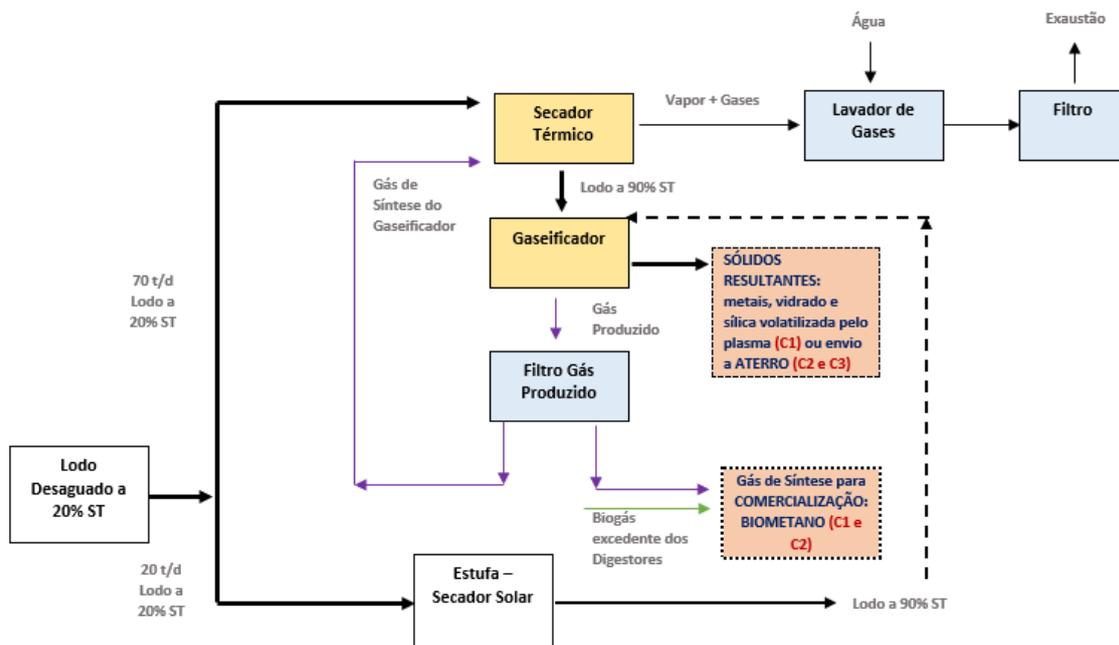
Fonte: elaboração própria.

Figura 4: Cenário “B” – Uso de Biogás excedente da ETE e compra de GN para secagem térmica do lodo, com as alternativas de uso agrícola (B1) ou destinação do lodo a 70% ST a Aterro Sanitário (B2).



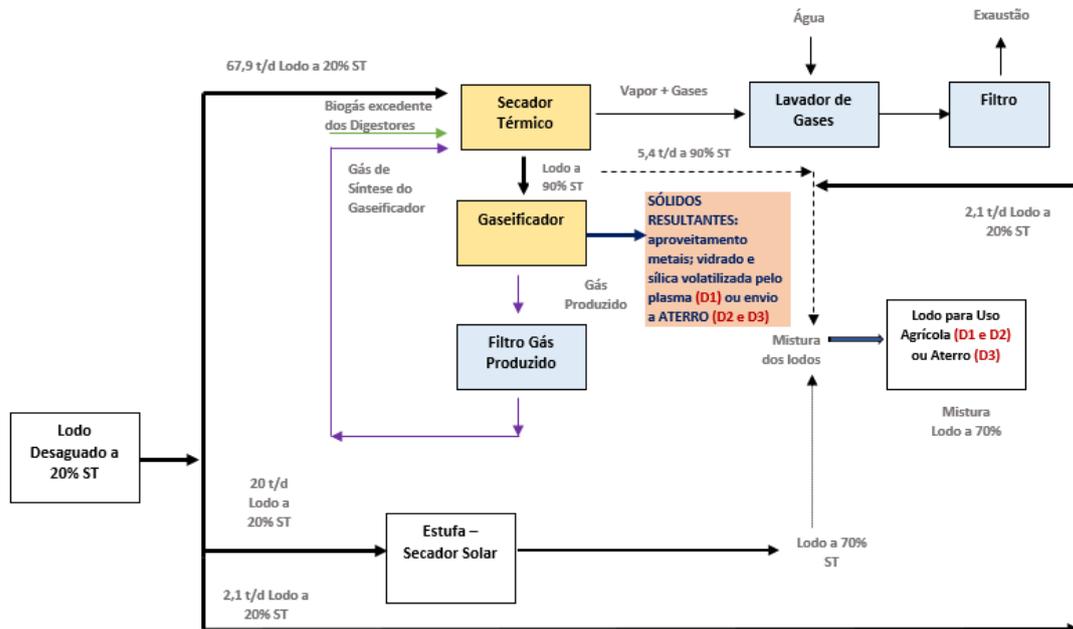
Fonte: elaboração própria.

Figura 5: Cenário “C” – Energia para secagem oriunda da Gaseificação a Plasma de todo o lodo seco, com geração de gás de síntese para comercialização juntamente com o biogás excedente (na forma de biometano) oriundo dos digestores de lodo. Possibilidade de aproveitamento dos sólidos resultantes (recuperação de metais, vidro, sílica volatilizada pelo plasma e carbono sólido) e de comercialização dos gases citados (vide alternativas C1 a C3 no quadro da tabela 5).



Fonte: elaboração própria.

Figura 6: Cenário “D” – Sistema Híbrido: Energia para secagem oriunda do Biogás excedente complementado pelo gás de síntese da Gaseificação a Plasma de “parte” do lodo seco. Possibilidade de aproveitamento dos sólidos resultantes da gaseificação (recuperação de metais, vidro, carbono e sílica volatilizada pelo Plasma em D1) ou envio ao aterro de inertes (D2 e D3). A mistura do lodo seco em estufa com o lodo a 90%ST (vindo do secador) e uma pequena fração vinda do pátio a 20% ST, resultando em 13,2 t/d de lodo a 70%ST, com possibilidade de uso agrícola (alternativas D1e D2) ou destinação a Aterro Sanitário (alternativa D3).



Fonte: elaboração própria.

APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para fins de simulação dos cenários e alternativas consideradas, foram assumidas as hipóteses mais abaixo.

Hipóteses simplificadoras

- ✓ A análise energética do subsistema de secagem térmica é realizada a partir da entrada do lodo de ETE com 20% de sólidos no secador.
- ✓ Biogás excedente dos digestores anaeróbios que será disponibilizado para a secagem do lodo será considerado como 2.687 Nm³/d.
- ✓ O lodo será seco a 90% de ST para posterior entrada no gaseificador.
- ✓ Por conservadorismo, serão admitidos como poderes caloríficos:
 - do biogás excedente da ETE => 5.500 kcal/Nm³;
 - do gás natural (GN) => 8.600 kcal/Nm³;
 - do lodo a 90% ST => 3.500 kcal/Nm³ e
 - do Biometano (oriundo do gás de síntese) gerado na gaseificação => 8.600 kcal/Nm³.

Os poderes caloríficos do lodo e do biogás baseiam-se em referências bibliográficas (Lumley *et al.*, 2014 *apud* FUNDUNESP, 2020b) no caso do lodo e em resultados empíricos realizados com o biogás da outra ETE operada pela Sabesp (CETESB, 2006).

- ✓ Não será considerada a energia térmica do lodo que sai do secador a até 100°C, pois pode haver perda dessa energia antes do envio ao gaseificador.
- ✓ No caso do “calor” gerado no plasma, embora deva suprir uma parte da energia necessária ao secador térmico gerando uma certa economia no consumo de combustível, tal fonte (calor) não foi considerada no presente balanço.
- ✓ Por simplificação para o cenário “C” (caso da gaseificação de todo o lodo gerado na ETE), para a mistura do lodo seco em estufa com o lodo seco termicamente, será considerado o teor de 90% de sólidos totais na simulação.
- ✓ Os custos com gás natural (GN) consideram o valor médio praticado, conforme fórmula e tabela da Gás Brasileiro (concessionária da região) para os mercados industrial e comercial, e os consumos estimados no presente estudo.
- ✓ Para fins de estimativa de receita com a venda do biometano (oriundo do gás de síntese), adotaremos a metade do preço médio praticado pela Gás Brasileiro na região para fornecimento industrial. Cabe destacar que somente esta alternativa de aproveitamento do gás gerado foi considerada no estudo, ou seja, não serão considerados o aproveitamento com geração de energia elétrica, calor ou outras aplicações que eventualmente podem até ser mais rentáveis.
- ✓ O preço considerado na disposição dos sólidos resultantes da gaseificação (resíduo classe II B) em aterro para inertes, foi estimado via site “Gerador de Preços para a construção civil – CYPE” (http://www.brasil.geradordeprecos.info/obra_nova/calculaprecio.asp?Valor=1|0_0|GRB020|gra_010_contenedor%20camion: 0 0 4 0 0#gsc.tab=0).
- ✓ Não foram consideradas eventuais receitas com a venda de biossólidos (na forma de fertilizante composto orgânico), mas apenas a “despesa evitada” com o transporte e disposição em aterro sanitário (situação atual do lodo gerado). Esta “despesa evitada” foi utilizada no “Fluxo de Caixa” das alternativas consideradas.
- ✓ Não foram considerados custos de depreciação no presente estudo comparativo das duas opções de rotas tecnológicas para o fornecimento de energia necessária à secagem térmica do lodo.
- ✓ Também não foram consideradas eventuais receitas com créditos de carbono.

RESULTADOS

Na sequência são apresentadas nas tabelas 1 a 4, as simulações com as massas e energias requeridas para cada cenário de secagem térmica, considerando as hipóteses simplificadoras já mencionadas.

Na tabela 5 é apresentado um quadro comparativo com os resultados econômicos para os diferentes cenários e configurações consideradas (alternativas estimadas).



Tabela 1: Simulação cenário “A” – Lodo a 50% e uso GN

Secagem Térmica ETE Franca		
<u>Considerações iniciais</u>		
Lodo desaguado à 20% ST	90.000	Kg/d
Lodo enviado a estufa	20.000	Kg/d
Lodo no pátio a 20% ST	18.500	Kg/d
Lodo à ser seco no secador	51.500	Kg/d
Secagem horária	2.146	Kg/h
Teor de sólidos Entrada	20	%
Teor de sólidos Saída	90	%
Lodo seco a 90% ST	476,85	Kg/h
Quant. de água a evaporar	1.668,98	Kg/h
Dado do secador (em implantação)	800	Kcal/KgH2O
Energia para secagem	1.335.185	Kcal/h
Energia para secagem por dia	-32,04	Gcal/d
<u>Biogás produzido nos digestores</u>		
Produção média diária de biogás	2.968	Nm ³ /d
Consumo de biogás para abastecimento da frota	187,25	Nm ³ /d
Acréscimo de 50% de flutuação diária da frota	280,88	Nm ³ /d
Biogás disponível	2.687	Nm ³ /d
Poder calorífico do biogás	5.500	Kcal/Nm ³
Energia bruta biogás	14,78	Gcal/d
Perdas térmica	15,00	%
Energia disponível biogás	12,56	Gcal/d
<u>Necessidade de energia externa para secagem</u>		
Energia necessária p/ secagem	-32,04	Gcal/d
Energia disponível biogás	12,56	Gcal/d
Energia complementar p/ secagem	-19,48	Gcal/d
Poder calorífico do gás natural	8.600	Kcal/Nm ³
Perdas térmicas no sistema	15,00	%
Quantidade de gás natural	2.665	Nm ³ /d
Valor do Nm ³ do gás natural (média calculada)	5,22	R\$/Nm ³
Custo mês com gás natural	417.348,40	R\$/mês
<u>Disposição do Lodo</u>		
Lodo para agricultura (a cerca de 50% ST)	35,66	t/d
Preço por tonelada para aterro	133,11	R\$/t
Lodo para aterro p/ dia caso não seja possível enviar para a agricultura	4.746,53	R\$/d
Lodo para aterro caso não seja possível enviar para a agricultura	142.396,01	R\$/mês
Custo mensal gás natural e aterro	559.744,41	R\$/mês
<u>Custo mensal Atual - Lodo no Aterro</u>		
Custo mensal Destinação ao Aterro - Atual: sem secagem térmica de lodo	303.490,80	R\$/mês

Fonte: elaboração própria.

Tabela 2: Simulação cenário “B” – Lodo a 70% e uso GN

Secagem Térmica ETE Franca		
<u>Considerações iniciais</u>		
Lodo desaguado à 20% ST	90.000	Kg/d
Lodo enviado à estufa (20% ST)	20.000	Kg/d
Lodo para secador térmico	70.000	Kg/d
Secagem Horária	2.917	Kg/h
Teor de sólidos Entrada	20	%
Teor de sólidos Saída	70	%
Lodo seco à 70% ST	833	Kg/h
Quant. de água a evaporar	2.083	Kg/h
Dado do secador (em implantação)	800	Kcal/KgH2O
Energia para secagem	1.666.667	Kcal/h
Energia para secagem por dia	-40,00	Gcal/d
<u>Biogás produzido nos digestores</u>		
Produção média diária de biogás	2.968,00	Nm ³ /d
Consumo de biogás para abastecimento da frota	187,25	Nm ³ /d
Acréscimo de 50% de flutuação diária da frota	280,88	Nm ³ /d
Biogás disponível	2.687,13	Nm ³ /d
Poder calorífico do biogás	5.500,00	Kcal/Nm ³
Energia bruta biogás	14,78	Gcal/d
Perdas térmica	15,00	%
Energia disponível biogás	12,56	Gcal/d
<u>Necessidade de energia externa para secagem</u>		
Energia necessária para a secagem	-40,00	Gcal/d
Energia disponível biogás	12,56	Gcal/d
Energia complementar p/ secagem	-27,44	Gcal/d
Poder calorífico do gás natural	8.600,00	Kcal/Nm ³
Perdas térmicas no sistema	15,00	%
Quantidade de gás natural	3.753,45	Nm ³ /d
Valor do Nm ³ do gás natural (média calculada)	5,07	R\$/ Nm ³
Custo dia	19.046,27	R\$/d
Custo mês	571.388,10	R\$/mês
<u>Destinação do Lodo</u>		
Lodo para agricultura (70% ST)	25,71	t/d
Preço por tonelada para aterro	133,11	R\$/t
Lodo para aterro p/ dia caso não seja possível enviar para agricultura	3.422,83	R\$/d
Lodo para aterro caso não seja possível enviar para agricultura	102.684,86	R\$/mês
<u>Custos gerais</u>		
Custo mensal com gás natural p/ secagem e envio de lodo a aterro	674.072,95	R\$/mês
<u>Custo mensal Atual - Lodo no Aterro</u>		
Custo mensal Destinação ao Aterro - sem secagem térmica de lodo	303.490,80	R\$/mês

Fonte: elaboração própria.



Tabela 3: Simulação cenário “C” – Gaseificação do Lodo

Secagem Térmica ETE Franca		
Considerações iniciais		
Lodo desaguado à 20% ST	90.000,00	Kg/d
Lodo enviado para estufa	20.000,00	Kg/d
Lodo para secador térmico	70.000,00	Kg/d
Secagem horária	2.916,67	Kg/h
Teor de sólidos Entrada	20,00	%
Teor de sólidos Saída	90,00	%
Lodo seco à 90% ST	648,15	Kg/h
Quant. De água a evaporar	2.268,52	Kg/h
Dado do secador (em implantação)	800,00	Kcal/KgH2O
Energia para secagem	1.814.814,81	Kcal/h
Energia para secagem por dia	-43,56	Gcal/d
Biogás produzido nos digestores		
Produção média diária de biogás	2.968,00	Nm³/d
Consumo de biogás para abastecimento da frota	187,25	Nm³/d
Acréscimo 50% de flutuação diária da frota	280,88	Nm³/d
Biogás disponível	2.687,13	Nm³/d
Poder calorífico do biogás	5.500,00	Kcal/Nm³
Energia bruta biogás	14,78	Gcal/d
Energia recuperada do lodo		
Lodo seco secador à 90%	648,15	Kg/h
Lodo seco estufa	185,19	Kg/h
Poder Calorífico do lodo seco	3.500,00	Kcal/Kg lodo
Energia recuperada do lodo	2.916.666,67	Kcal/h
Energia recuperada do lodo por dia	70,00	Gcal/d
Energia lodo seco acrescida da energia do biogás		
Energia recuperada do lodo por dia	84,78	Gcal/d
Saldo de energia		
Energia recuperada do lodo por dia	70,00	Gcal/d
Energia para secagem por dia	-43,56	Gcal/d
Perdas térmicas	15,00	%
Saldo de energia	19,91	Gcal/d
Biometano equivalente (do gaseificador e digestor)	4.033,76	Nm³/d
Eventual Receita com Biometano (gás de síntese e biogás excedente convertidos)		
Venda de biometano	2,61	R\$/Nm³
Venda de biometano mês	315.834,21	R\$/mês
Custos de operação de insumos Plasma		
Energia Elétrica por Kg de lodo	1,00	Kwh/Kg lodo
Lodo Seco	833,33	Kg lodo/h
Energia Elétrica por hora	833,33	Kw
Energia Elétrica dia	20,00	Mw/d
Custo da energia elétrica	270,00	R\$/Mw
Valor EE	5.400,00	R\$/d
Tarugo de grafite por dia	2.000,00	R\$/d
Custo dos insumos plasma (EE+eletrodo)	222.000,00	R\$/mês
Destinação do Lodo		
Vidrado a beneficiar	7,20	t/d
Preço por tonelada para aterro	133,11	R\$/t
Preço por tonelada para disposição de inertes	55,30	R\$/t
Vidrado para aterro caso não seja possível uso benéfico	11.944,80	R\$/mês
Custos gerais		
Custo mensal Insumos Plasma e EE e beneficiamento do vidrado	222.000,00	R\$/mês
Custo mensal Insumos Plasma e EE e vidrado em Aterro	233.944,80	R\$/mês
Custo mensal Atual - Lodo no Aterro		
Custo atual mensal com aterro (Atual: sem secagem térmica do lodo)	303.490,80	R\$/mês

Fonte: elaboração própria.

Tabela 4: Simulação cenário “D” – Híbrido

Secagem Térmica ETE Franca		
Considerações iniciais		
Lodo desaguado à 20%	90.000,00	Kg/d
Lodo para estufa	20.000,00	Kg/d
Lodo pátio à 20%	2.100,00	Kg/d
Lodo p/secador térmico	67.900,00	Kg/d
Secagem horária	2.829,17	Kg/h
Teor de sólidos Entrada	20,00	%
Teor de sólidos Saída	90,00	%
Lodo seco à 90%ST	628,70	Kg/h
Água a evaporar	2.200,46	Kg/h
Dado do secador (em implantação)	800,00	Kcal/Kg
Energia para secagem	1.760.370,37	Kcal/h
Secagem dia	-42,25	Gcal/d
Biogás produzido nos digestores		
Produção média diária de biogás	2968,00	Nm³/d
Consumo de biogás para abastecimento da frota	187,25	Nm³/d
Acréscimo de 50% de flutuação diária da frota	280,88	Nm³/d
Biogás disponível	2687,13	Nm³/d
Poder calorífico do biogás	5500,00	Kcal/Nm³
Energia bruta do biogás digestor	14,78	Gcal/d
Energia recuperada do lodo		
Lodo seco à 90%	403,70	Kg/h
Poder Calorífico do lodo seco	3500,00	Kcal/Kg
Energia recuperada do lodo	1412962,96	Kcal/h
Energia recuperada do lodo p/ dia	33,91	Gcal/d
Energia lodo seco acrescida da energia do biogás		
Energia recuperada do lodo p/ dia	33,91	Gcal/d
Energia bruta do biogás digestor	14,78	Gcal/d
Energia bruta total	48,69	Gcal/d
Saldo de energia		
Energia recuperada do lodo por dia	48,69	Gcal/d
Secagem dia	-42,25	Gcal/d
perdas térmicas	15,00	%
Saldo de energia líquida	0,10	Gcal/d
Custos de operação de insumos Plasma		
Custos com Energia Elétrica (EE)		
Energia Elétrica por Kg de lodo	1	Kwh/Kg
Quantidade de lodo Seco	403,70	Kg lodo/h
Energia Elétrica por hora	403,70	Kw
Energia Elétrica dia	9,69	Mw/d
Custo da energia elétrica	270,00	R\$/Mw
Custo diário (EE)	2.616,00	R\$/d
Tarugo de grafite por dia	1.500,00	R\$/d
Custo insumos plasma	123.480,00	R\$/mês
Lodo para Agricultura		
Lodo pátio a 20% ST	2.100,00	Kg/d
Lodo seco para o pátio à 90% ST	5.400,00	Kg/d
Lodo da Estufa a 70% ST	5.714,29	Kg/d
Lodos misturados no pátio a 70% ST	13.214,29	Kg/d
Lodo para agricultura a 70% ST	13,21	t/d
Preço por tonelada para aterro	133,11	R\$/t
Lodo para aterro p/ dia caso não seja possível enviar para a agricultura	1.758,95	R\$/d
Lodo para aterro caso não seja possível enviar para a agricultura	52.768,61	R\$/mês
Sólidos Resultantes		
Vidrado e outros para beneficiamento	3,88	t/d
Preço por tonelada p/ disposição de inertes	55,30	R\$/t
Vidrado e outros para aterro caso não seja possível beneficiamento	214,32	R\$/d
Vidrado para aterro caso não seja possível beneficiamento	6.429,55	R\$/mês
Custo mensal Insumos Plasma, EE e Aterro		
Sem aproveitamento Vidrado e lodo	182.678,15	R\$/mês
Com beneficiamento e aproveitamento de lodos e vidrado	123.480,00	R\$/mês
Custo mensal Atual - Lodo no Aterro		
Custo atual com aterro	10.116,36	R\$/d
Custo atual mensal com aterro (sem secagem térmica)	303.490,80	R\$/mês

Fonte: elaboração própria.

Tabela 5: Quadro comparativo com os resultados econômicos para as alternativas.

Alternativa	Cenários	Despesas Operacionais				Economia circular	Receitas R\$/mês	Saldo R\$/mês	CAPEX Investimento (R\$)	Fluxo Caixa Comparação C/ Situação atual (R\$/mês)	Fluxo Caixa Comparação C/ Situação atual (R\$/ANO)	VPL (10 anos)	Payback Descontado (anos)
		Gás natural R\$/mês	Aterro R\$/mês	Insumos para o aterro R\$/mês	Mão de obra e reposição peças (oper. e manut.) R\$/mês								
	Atual: Todo lodo para aterro (**)		303.490,80					-303.490,80					
A1	Lodo p/ Agricultura a 50%ST (GN complementar)	417.348,40			8.557,73	- Possibilidade de envio de 35,7 t/d de lodo para a agricultura.		-425.906,13	2.053.856,00	-122.415,33	-1.468.984,01		
A2	Lodo p/ Aterro a 50%ST (GN complementar)	417.348,40	142.396,01		8.557,73			-568.302,14	2.053.856,00	-264.811,34	-3.177.736,09		
B1	Lodo p/ Agricultura a 70%ST (GN complementar)	571.388,10			8.557,73	- Possibilidade de envio de 25,7 t/d de lodo para a agricultura.		-579.945,83	2.053.856,00	-276.455,03	-3.317.460,37		
B2	Lodo p/ Aterro a 70%ST (GN complementar)	571.388,10	102.684,86		8.557,73			-682.630,69	2.053.856,00	-379.139,89	-4.549.678,65		
C1	Gaseificação do Lodo (Beneficiamento dos sólidos resultantes e venda do biometano)			222.000,00	41.816,23	- Venda do biometano* e - beneficiamento do vidrado. - Não utiliza combustível fóssil.	315.834,21	52.017,99	10.035.894,00	355.508,79	4.266.105,44	32.750.533,92	2,50
C2	Gaseificação do Lodo (sólidos resultantes Aterro inertes e venda do biometano)		11.944,80	222.000,00	41.816,23	- Venda do biometano*. - Não utiliza combustível fóssil.	315.834,21	40.073,19	10.035.894,00	343.563,99	4.122.767,84	31.650.143,18	2,60
C3	Gaseificação do Lodo (Sól. resultantes Aterro inertes sem venda gás)		11.944,80	222.000,00	41.816,23	- Não utiliza combustível fóssil.		-275.761,03	10.035.894,00	27.729,78	332.757,30	2.554.549,90	>30
D1	Híbrido e Lodo Agricultura (parte do lodo gaseificado e beneficiamento Sól. Resultantes)			123.480,00	30.730,06	- Envio de 13,2 t/d de lodo para a agricultura e - beneficiamento cinzas. - Não utiliza combustível fóssil.		-154.210,06	7.375.214,67	149.280,74	1.791.368,87	13.752.188,65	4,74
D2	Híbrido e Lodo Agricultura (parte do lodo gaseificado e sól. resultantes no Aterro)		6.429,55	123.480,00	30.730,06	- Envio de 13,2 t/d de lodo para a agricultura. - Não utiliza combustível fóssil.		-160.639,61	7.375.214,67	142.851,19	1.714.214,31	13.159.879,56	5,00
D3	Híbrido e Aterro (parte do lodo gaseificado c/ lodo e sól. resultantes no Aterro de inertes)		59.198,15	123.480,00	30.730,06	- Não utiliza combustível fóssil.		-213.408,21	7.375.214,67	90.082,59	1.080.991,02	8.298.677,47	9,20

Fonte: elaboração própria.

(**) Foi considerado como custo evitado na avaliação, tendo seu valor abatido dos demais custos nas alternativas consideradas.

TMA: Utilizado 8,11% a.a. (com base no custo médio ponderado de capital - WACC).

OBS: Não está considerada a receita com eventual venda de biossólidos para agricultura (composto orgânico), mas apenas o custo evitado com seu transporte e disposição em aterro sanitário, conforme acima.

Como já exposto, para fins de avaliação dos fluxos de caixa, foram consideradas as despesas operacionais com insumos, transporte e disposição de resíduos em aterros (sanitário no caso do lodo e de inertes no caso dos resíduos resultantes do plasma), mão de obra e demais despesas para operação e manutenção do sistema. Os custos de investimento dos subsistemas avaliados (basicamente gerador de vapor e acessórios para os cenários A e B; gerador de vapor e acessórios complementados por 3 ou 2 fornos gaseificadores e acessórios para os cenários C e D, respectivamente), foram estimados com base em adaptações a orçamentos preliminares (CAPEX). A energia elétrica e o consumo de eletrodos de grafite (caso da gaseificação a plasma) tiveram como base, resultados obtidos em outra planta/ piloto. Para as demais despesas, como mão de obra para operação e manutenção (em ambos sistemas), além de peças de reposição e demais materiais de consumo, foi adotado o valor anual de 5% sobre o valor do CAPEX.

Com base nos resultados, pode-se observar que as alternativas que abordam a **gaseificação** com geração e comercialização de gás de síntese na forma hipotética de biometano (gaseificação de todo o lodo gerado na planta – cenário C), são as de melhor retorno, com paybacks previstos de 2,50 anos (caso de beneficiamento dos sólidos resultantes – vidrado, metais, sílica e carbono sólido – alternativa C1 da tabela 5) e 2,60 anos (caso os sólidos resultantes sejam dispostos em aterro de inertes – alternativa C2). Tais resultados podem ainda ser otimizados com eventual venda dos sólidos resultantes beneficiados e ainda, com a contabilização do aproveitamento do “calor” gerado no plasma que poderá reduzir o consumo de combustível, ou seja, liberando ainda mais biometano para comercialização, além de eventual receita por créditos de carbono, não considerados no presente balanço. Por outro lado, esta alternativa não parece economicamente adequada caso o gás produzido não seja de alguma forma aproveitado, seja para gerar energia elétrica, calor ou para ser comercializado (alternativa C3).

As alternativas com **gaseificação parcial** do lodo (quantidade que apenas garanta a autossuficiência energética para o secador térmico) chamadas de “Híbrido” (cenário D), desde que ao menos o lodo não gaseificado seja devidamente beneficiado (no exemplo, destinado à agricultura) e não enviado para aterro sanitário (alternativas D1 e D2), apresentam viabilidade com paybacks de 4,74 e 5,00 anos, respectivamente. Ou seja, caso o lodo não gaseificado não

seja beneficiado (pode ter outros usos além da aplicação na agricultura) e sim enviado a aterro sanitário, economicamente a alternativa passa a ter payback de 9,20 anos (alternativa D3).

As alternativas com a aquisição de gás natural e uso de gerador de vapor (cenários A e B em todas as alternativas consideradas na Tabela 5) mostraram-se as de maior valor de OPEX, apresentando fluxos de caixa negativos para as simplificações consideradas nesse estudo.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

No presente estudo buscou-se avaliar de forma bastante simplificada e para fins de comparação, a utilização de duas diferentes fontes de energia para a promoção da secagem térmica do lodo de uma Estação de Tratamento de Esgoto, utilizando-se como referência a ETE Franca, localizada do município de mesmo nome no estado de São Paulo.

Para tanto foram consideradas: (i) a aplicação do biogás gerado na ETE (excedente ao que já é utilizado na produção de gás veicular), complementado por gás natural (GN) adquirido de concessionária e a utilização de gerador de vapor ou; (ii) a gaseificação a plasma do lodo seco, utilizado como combustível, gerando calor e gás de síntese que não só alimenta o gerador de vapor de forma autossustentável (só é necessária energia externa para se iniciar o processo), como sua geração em excesso ainda pode ser convertida a biometano de forma a ser comercializado. Observa-se que o aproveitamento do calor gerado pelo plasma não foi considerado neste balanço simplificado, o que sinaliza possibilidade de uma otimização nos resultados preliminares.

Ambas fontes energéticas foram simuladas em diferentes configurações, considerando o beneficiamento ou não do lodo seco a 50% ST (alternativas A1 e A2 da tabela 5) e a 70% ST (alternativas B1 e B2, respectivamente), assim como gaseificação total do lodo com ou sem a venda de gás de síntese (na forma de biometano) e beneficiamento ou não dos sólidos resultantes da gaseificação (alternativas C1, C2 e C3) e o uso de sistema Híbrido com gaseificação de parte do lodo, com ou sem beneficiamentos do lodo excedente e dos sólidos resultantes da gaseificação parcial (alternativas D1 a D3, detalhadas na tabela 5).

A escolha das melhores alternativas estudadas dependerá muito dos objetivos e mercado disponível, seja para a venda do biometano gerado, ou o beneficiamento dos resíduos como uso agrícola do lodo seco, recuperação para beneficiamento dos sólidos resultantes da gaseificação (como recuperação de metais, vidro, carbono sólido e sílica volatilizada pelo plasma) entre outros possíveis benefícios ou aspectos relevantes considerados, como redução de emissões de gás de efeito estufa (GEE) e eventual venda de créditos de carbono.

A princípio, considerando-se apenas a análise econômica simplificada, em havendo a possibilidade de comercialização para o gás gerado (biometano), as alternativas com menor payback foram a **gaseificação de todo o lodo** gerado na planta com a **venda do biometano** produzido e o beneficiamento dos sólidos resultantes (alternativa C1), com payback de cerca de 2 anos e meio. A alternativa é seguida pela C2, diferindo apenas pelo envio dos sólidos resultantes para aterro de inertes (caso não se encontre nesse momento, oportunidade para sua destinação mais benéfica), com payback de cerca de 2 anos e 7 meses.

As alternativas com **gaseificação parcial** do lodo, desde que o lodo parcialmente seco resultante seja destinado à agricultura ou outro uso benéfico que não o aterro sanitário (alternativas D1 e D2), também apresentam bons retornos, com paybacks de 4,74 e 5,0 anos respectivamente. Ainda na pior hipótese desse cenário, ou seja, com o envio do lodo e sólidos resultantes para aterro sanitário e de inertes, o payback foi estimado em 9,20 anos. Ainda há que ser considerada a possibilidade de implantação de forma modular tanto nas alternativas do cenário C quanto D, com oportunidades de processamento de outros tipos de resíduos de composição variável, o que possibilita futura expansão de negócios com o aproveitamento energético de outras biomassas e resíduos na região.

Consideradas as simplificações do presente estudo, as alternativas que avaliaram o uso de GN complementar ao biogás da ETE, apresentaram fluxos de caixa negativos. Entretanto vale lembrar que não estão contabilizados eventuais ganhos com créditos de carbono, ou com a venda dos subprodutos: biossólidos e sólidos resultantes da gaseificação (vidro, metais, sílica e carbono sólido) ou outras aplicações para a energia excedente que não a simples comercialização do biometano, mas que carecem de estudo de mercado. Também não estão contabilizadas possíveis economias de combustíveis com o aproveitamento do calor gerado no plasma ou no lodo seco que também podem otimizar os resultados e ser objeto de estudos complementares.

De qualquer forma, mesmo que não haja num primeiro momento um uso mais benéfico para os sólidos e lodo resultantes em cada um dos processos estimados, minimamente haverá sensível redução no envio de lodos ao aterro sanitário, com ganhos ambientais e pleno atendimento legal, em consonância com os princípios do ESG (responsabilidade ambiental, social e de governança).

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CETESB. Biogás: pesquisas e projetos no Brasil. CETESB, Secretaria do Meio Ambiente. São Paulo: SMA, 2006. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/biogas/wp-content/uploads/sites/3/2014/01/livrobiogas.pdf> Acesso em: 05/05/2023.
2. DA SILVA, L.H.P.; DA SILVA, S.P.R; PALHA, M.L.A. P.F.; NASCIMENTO JÚNIOR, A. F. do. Gaseificação dos lodos de estações de tratamento de esgoto dos tipos Convencional e UASB. Capítulo 22_pags.225-233. Demandas essenciais para o avanço da engenharia sanitária e ambiental 2 [recurso eletrônico] / Organizador Helenton Carlos da Silva. – Ponta Grossa, PR: Atena Editora, 2020. DOI 10.22533/at.ed.47920210122. Disponível em: <https://www.atenaeditora.com.br/catalogo/post/gaseificacao-dos-lodos-de-estacoes-de-tratamento-de-egoto-dos-tipos-convencional-e-uasb>. Acesso em: 16/05/2023.
3. ECOVERDEN. Tabela dos poderes caloríficos. Disponível em: <http://www.ecoverden.com.br/files/tabelaPoderCalorificoGrifado.pdf>. Acesso em: 16/05/2023.
4. FUNDUNESP- Fundação para o Desenvolvimento da UNESP. Prestação de serviços para elaboração e desenvolvimento de Projeto de pesquisa referente a uma planta piloto para gaseificação dos resíduos provenientes das estações de tratamento de esgotos da unidade de negócios Capivari/Jundiaí na ETE Várzea Paulista. Contrato Sabesp nº 10600626 /2020. Relatório mensal – setembro/2020.
5. FUNDUNESP- Fundação para o Desenvolvimento da UNESP. Prestação de serviços para elaboração e desenvolvimento de Projeto de pesquisa referente a uma planta piloto para gaseificação dos resíduos provenientes das estações de tratamento de esgotos da unidade de negócios Capivari/Jundiaí na ETE Várzea Paulista. Contrato Sabesp nº 10600626 /2020. Relatório mensal – outubro/2020b.
6. FUNDUNESP- Fundação para o Desenvolvimento da UNESP. Prestação de serviços para elaboração e desenvolvimento de Projeto de pesquisa referente a uma planta piloto para gaseificação dos resíduos provenientes das estações de tratamento de esgotos da unidade de negócios Capivari/Jundiaí na ETE Várzea Paulista. Contrato Sabesp nº 10600626 /2020. Relatório mensal – novembro/2020c.
7. GÁS BRASILIANO. Manual de Instalações - Segmentos Residencial e Comercial. V.1.
8. MIGLIACCIO, R.; BRACHI, P; MONTAGNARO, F.; PAPA, S.; TAVANO, A.; MONTESARCHIO, P.; RUOPPOLO, G. and URCIUOLO, M. Sewage Sludge Gasification in a Fluidized Bed: Experimental Investigation and Modeling. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2021, 60, 5034–5047. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/acs.iecr.1c00084>. Acesso em 18/05/2023.
9. OKAMURA, L. A.; TOMAZZONI, G.; LOPES, E.J.; COSTA NETO, P.R. Obtenção sustentável de gás de síntese: prospecção das tecnologias disponíveis baseada em patentes e artigos. *Cadernos de Prospecção* - ISSN 1983-1358 (print) 2317-0026 (online), 2013, vol.6, n.1, p.27-35. D.O.I.: <http://dx.doi.org/10.9771/S.CPROSP.2013.001.004>.
10. OLIVEIRA SILVA, J. Caracterização do potencial energético e estudo físico-químico do lodo da estação de tratamento de esgoto do DMAE-Uberlândia-MG. Dissertação de mestrado apresentada à Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2011.
11. OLIVEIRA, L.S.; SILVA, D.P.; SILVA, I.P. O uso da gaseificação de biomassa como energia renovável: uma revisão bibliográfica das motivações e aplicações. *Anais do IX Simpósio de Engenharia de Produção de Sergipe* (2017). Disponível em:

- <https://ri.ufs.br/bitstream/riufs/7619/2/GaseificacaoBiomassaMotivacoesAplicacoes.pdf>. Acesso em: 19/05/2023.
12. PARODI, F.A.; SANCHEZ, C. G. Aspectos da co-gaseificação de resíduos agroindustriais e municipais. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. Disponível em: <http://www.proceedings.scielo.br/pdf/agrener/n4v1/023.pdf>. Acesso em: 22/05/2023.
 13. PAULINO, R.F.S. Modelagem para dimensionamento de gaseificador a plasma: aspectos técnicos e Econômicos. Tese apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, UNESP. Guaratinguetá, 2021.
 14. ROSA, A.P.; CHERNICHARO, C. A.L.; BANDEIRA DE MELO, G.C. Contribuição para o aproveitamento energético do lodo de ETEs em processos térmicos. Revista DAE_ jan-abr., 2015. DOI: 10.4322/dae.2014.140.
 15. SANTOS, Y. B. I. Desenvolvimento de sistema computacional para avaliação de lodo de esgoto sanitário como biomassa na geração de energia. Tese de Doutorado apresentada à Universidade Federal do Pará. Belém, 2012. Disponível em: <https://proderna.propesp.ufpa.br/ARQUIVOS/teses/Yvelyne.pdf>. Acesso em 19/05/2023.
 16. SIMA. Resolução nº 047, de 06 de agosto de 2020. Secretaria de Estado de Infraestrutura e Meio Ambiente. Republicada no DOE de 29/08/2020 – seção I págs. 32/34.
 17. VIRMOND, E. Aproveitamento do Lodo de Tratamento Primário de Efluentes de um Frigorífico como Fonte de Energia. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2007.