unesp UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

SYLVIA HELENA PINTO CHAGAS LEITE

MODELAGEM DE CICLOS TÉRMICOS COM APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RESÍDUOS DE ESGOTO

Guaratinguetá - SP
2016

Sylvia Helena Pinto Chagas Leite

Modelagem de ciclos térmicos com aproveitamento energético de resíduos de esgoto

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Energia.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri.
Co-orientador: Prof. Dr. Mateus Ricardo Nogueira Vilanova.

Guaratinguetá
2016

L533m

Leite, Sylvia Helena Pinto Chagas
Modelagem de ciclos térmicos com aproveitamento energético de resíduos de esgoto / Sylvia Helena Pinto Chagas Leite. – Guaratinguetá, 2016.
85 f. : il.

Bibliografia: f. 69-73

Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2016.

Orientador: Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coorientador: Prof. Dr. Mateus Ricardo Nogueira Vilanova

1. Biogás 2. Esgotos 3. Geração de energia I. Título

CDU 662.767(043)

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

SYLVIA HELENA PINTO CHAGAS LEITE

ESTA TESE FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
"MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: ENERGIA

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. José Antonio Perrella Balestieri
Coordenador

B A N C A E X A M I N A D O R A:

Prof. Dr. JOSÉ ANTONIO PERRELLA BALESTIERI
Orientador / UNESP-FEG

Prof. Dr. RUBENS ALVES DIAS
UNESP/FEG

Profa. Dra. DIOVANA APARECIDA DOS SANTOS NAPOLEÃO
EEL/USP

Julho de 2016

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar agradeço a Deus, fonte da vida e da graça. Agradeço pela minha vida, minha família e meus amigos,

ao meu orientador, *Prof. Dr. José Antônio Perrella Balestieri* que jamais deixou de me incentivar. Sem a sua orientação, dedicação e auxílio, o estudo aqui apresentado seria praticamente impossível,

ao meu co-orientador, *Prof. Dr. Mateus Ricardo Nogueira Vilanova* pelo esforço e dedicação em ajudar,

a minha mãe *Vera*, que apesar das dificuldades enfrentadas, sempre incentivou meus estudos,

aos funcionários da Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá pela dedicação, presteza e principalmente pela vontade de ajudar,

aos meus amigos que estiveram sempre me apoiando e acreditando em mim,

ao meu namorado e melhor amigo, *Lucas*, pelo apoio em todos os momentos,

ao Sr. *Edgardo Vescovo* pela ajuda com os dados utilizados no trabalho e motivação na pesquisa.

LEITE, S.H.P.C. **Modelagem de ciclos térmicos com aproveitamento energético de resíduos de esgoto.** 2016. 85 f. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

RESUMO

Um dos grandes problemas existentes ainda no mundo diz respeito ao destino dado ao esgotamento doméstico, tanto do ponto de vista ambiental quanto do ponto de vista de planejamento de cidades. Diversas formas de aproveitamento dos resíduos de esgoto podem ser propostas, seja na forma de energia, seja na forma de produção de algum recurso ou matéria prima, tais como biogás, nutrientes, biocombustíveis, bioplásticos, biopesticidas, dentre outros. As tecnologias usualmente empregadas para o aproveitamento energético de resíduos de esgoto são as turbinas, microturbinas e motores adaptados ao uso de biogás. O presente estudo tem por objetivos modelar ciclos térmicos de geração termelétrica e de cogeração movidos por biogás derivado do tratamento de esgotos a partir de levantamento tecnológico, avaliar o custo dos produtos energéticos gerados pelas centrais térmicas analisadas, bem como o potencial de aplicação das centrais geradoras de energia em diferentes escalas de capacidade, visando a maior sustentabilidade energética de cidades. A modelagem é feita com base em dados de três municípios com aproximadamente 10 mil, 100 mil e um milhão de habitantes e são feitas análises para o cenário atual, com análise de sensibilidade ao preço de compra e venda de energia elétrica e à taxa de juros, além de analisar alternativas utilizando comercialização de créditos de carbono, cargas parciais e biogás de aterro sanitário em conjunto com o biogás de esgoto. Como resultado tem-se que em nenhuma análise houve geração de energia para a cidade de 10 mil habitantes e que nas cidades de 100 mil e um milhão de habitantes a energia gerada não supre as necessidades da estação de tratamento de esgotos, resultando na compra de energia da concessionária.

PALAVRAS-CHAVE: Ciclos térmicos. Biogás. Esgoto. Geração de energia. Planejamento sustentável de cidades.

LEITE, S.H.P.C. **Thermal cycle models with energetic use of sludge sewage.** 2016. 85 p. Dissertation (Master in Mechanical Engineering) - Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2016.

ABSTRACT

One of the still big problems in the world with regard to the destination of the domestic sewage from an environmental point of view and from the point of view of city planning. Various forms of utilization of sewage waste can be brought, either in the form of energy production is in the form of a resource or raw material, such as biogas, nutrients, biofuels, bioplastics, biopesticides, among others. The technologies usually employed for energy recovery of waste sewage are the turbines, engines and micro turbines adapted to the use of biogas. This study aims to model thermal cycles of thermal generation and cogeneration fueled by biogas derived from sewage treatment from technological survey, assess the cost of energy products generated by the analyzed thermal power plants, as well as the application potential of central power generating capacity at different levels, aimed at greater energy sustainability of cities. The modeling is based on three municipalities data with approximately 10.000, 100.000 and 1 million people and analyzes are made to the current situation, with sensitivity analysis to the purchase and sale price of electricity and interest rate, and analyzing alternatives using the trading of carbon credits, partial loads and landfill biogas with biogas sewage. As a result it has been that in any analysis was generating power to the city of 10.000 inhabitants and in cities of 100.000 and 1 million inhabitants the energy generated does not meet the needs of the sewage treatment plant, resulting in the purchase of utility power .

KEYWORDS: Thermal cycles. Biogas. Sewage. Power generation. Sustainable city planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Etapas de tratamento de esgoto 21
Figura 2 – Biodigestor contínuo 23
Figura 3 – Biodigestor descontínuo 23
Figura 4 – Sistema de purificação de biogás 25
Figura 5 – Turbina a gás 26
Figura 6 – Funcionamento de um motor em ciclo Otto 28
Figura 7 – Otimização com software 31
Figura 8 – Aproveitamento dos gases de exaustão 37
Figura 9 - Superestrutura a ser otimizada 41
Figura 10 - Resultados para a análise de sensibilidade ao preço de compra de energia elétrica 47
Figura 11- Resultados para a análise de sensibilidade ao preço de compra de energia elétrica (ampliado para Roseira e Guaratinguetá) 47
Figura 12 - Resultados para a análise de sensibilidade ao preço de venda de energia elétrica 48
Figura 13 - Resultados para a análise de sensibilidade à taxa anual de juros 49
Figura 14- Resultados para a análise de sensibilidade à taxa anual de juros (ampliado para Roseira e Guaratinguetá) 50
Figura 15 - Análise de sensibilidade ao preço de certificados de emissões evitadas de CO_2 .. 52
Figura 16 - Análise de sensibilidade ao preço de certificados de emissões evitadas de CO_2 (ampliado para Guaratinguetá) 52
Figura 17 - Análise de sensibilidade ao preço de certificados de emissões evitadas de CO_2 (ampliado para Campinas) 53
Figura 18 – Cargas parciais do motor J320 56

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Componentes do biogás e seus efeitos 24
Tabela 2 - Dados das estações de tratamento de esgotos dos municípios estudados 32
Tabela 3 - Vazões de biogás e potências necessárias para as estações de tratamentos de esgotos dos municípios estudados 34
Tabela 4 - Dados das microturbinas Capstone estudadas. 34
Tabela 5 - Dados dos motores GE Jenbacher estudados. 35
Tabela 6 - Vazões de combustível necessárias. 36
Tabela 7 - Vazão mássica de água para os biodigestores dependendo do equipamento 38
Tabela 8 - Custos das microturbinas Capstone 39
Tabela 9 - Custos relativos aos motores GE Jenbacher estimados 40
Tabela 10 - Resultados para modelagem atual 46
Tabela 11 - Dados das microturbinas Capstone em cargas parciais 54
Tabela 12 - Motores GE Jenbacher em cargas parciais 56
Tabela 13 – Vazões de combustível para os equipamentos operando em cargas parciais 58
Tabela 14 – Despesas nas cidades com os equipamentos operando em cargas parciais 58
Tabela 15 – Equipamentos indicados quando operando em cargas parciais (número de equipamentos e modelo) 59
Tabela 16 – Produção de resíduos sólidos urbanos nas cidades estudadas 60
Tabela 17 – Metano gerado em aterro sanitário nas cidades estudadas 62
Tabela 18 – Vazão mássica de biogás de aterro necessária aos equipamentos 62
Tabela 19 - Resultados para modelagem com biogás de aterro 64
Tabela 20 - Análise comparativa de economia para os municípios estudados 66

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 10
1.1 OBJETIVO 11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 13
3 EMBASAMENTO TEÓRICO 20
3.1. ESGOTOS 20
3.2. PROCESSO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS E SUA IMPORTÂNCIA 20
3.3. BIOGÁS 22
3.4. BIODIGESTORES CONTÍNUOS E DESCONTÍNUOS 22
3.5. PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS 24
3.6. TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS 25
3.6.1. Turbinas e microturbinas a gás 26
3.6.2. Motores de combustão interna 27
3.7. COGERAÇÃO 28
3.8. ENGENHARIA ECONÔMICA 28
3.9. OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS 30
4 MATERIAIS E MÉTODOS 32
4.1. GERAÇÃO DO BIOGÁS 32
4.2. EQUIPAMENTOS 34
4.3. CUSTOS 38
4.4. FORMULAÇÃO 41
4.5. MODELAGEM 44
4.5.1. Cenário 1. Modelagem atual 44
4.5.2. Cenário 2. Análise de sensibilidade ao preço de compra de energia elétrica 44
4.5.3. Cenário 3. Análise de sensibilidade ao preço de venda de energia elétrica 45
4.5.4. Cenário 4. Análise de sensibilidade à taxa anual de juros 45
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO 46
5.1. Cenário 1. Modelagem atual 46
5.2. Cenário 2. Análise de sensibilidade ao preço de compra de energia elétrica 47
5.3. Cenário 3. Análise de sensibilidade ao preço de venda de energia elétrica 48
5.4. Cenário 4. Análise de sensibilidade à taxa anual de juros 49
5.5. Alternativa utilizando comercialização de créditos de carbono 51
5.6. Alternativa utilizando cargas parciais 54

5.7. Alternativa utilizando biogás gerado em aterros sanitários junto com o biogás de esgoto60
5.8. Análise comparativa de economia para os municípios estudados.....66
6 CONCLUSÕES.....67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 69
ANEXO A – MODELAGEM DE REFERÊNCIA 74
ANEXO B – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO TRABALHO 77

1 INTRODUÇÃO

A adequada destinação e tratamento de esgotos domésticos é um dos grandes desafios mundiais na área do saneamento, tanto do ponto de vista ambiental quanto do ponto de vista de planejamento de cidades. No Brasil, segundo o Censo (IBGE, 2010), apenas 55,45% das residências que possuem sanitários está conectada a redes de esgoto, sendo que em alguns estados da Região Norte do país os números são ainda mais alarmantes, como é o caso de Rondônia, onde somente 6,07% das residências contam com esgotamento sanitário.

Segundo a Fundação Nacional de Saúde (FUNASA, 2015), o destino adequado dos esgotos tem impacto direto em três aspectos: sanitário, desenvolvimento econômico e social e ambiental. Do ponto de vista sanitário, o essencial é a eliminação de focos de contaminação visando o controle e prevenção de doenças relacionadas ao esgoto, evitando poluição do solo e degradação de mananciais, melhorando as condições sanitárias locais e reduzindo gastos com campanhas de imunização e erradicação de moléstias. No aspecto de desenvolvimento econômico e social, os fatores relacionados ao saneamento interferem no aumento da vida média do homem, pela redução da mortalidade em consequência da redução dos casos de doenças; na diminuição das despesas com o tratamento de doenças evitáveis; na redução do custo do tratamento da água de abastecimento, devido a melhor qualidade da água bruta, pela prevenção da poluição dos mananciais; no controle da poluição das praias e dos locais de recreação com o objetivo de promover o turismo; na preservação da biota aquática, especialmente os criadouros de peixes; com a obtenção de maior disponibilidade hídrica para a instalação de indústrias devido à conservação dos recursos naturais. No aspecto ambiental, as soluções sustentáveis para o tratamento e disposição final dos esgotos são importantes para evitar que substâncias presentes nos esgotos modifiquem as características da água levando a morte de peixes e organismos aquáticos.

Os resíduos de esgotamento sanitários são compostos tanto de frações gasosas (biogás) quanto sólidas (lodo de esgoto), sendo que ambas representam problemas para o meio ambiente se forem descartadas sem terem sofrido o tratamento adequado. Este tratamento é composto por diversos processos, sendo estes: processos físicos para concentração do teor de sólidos, através do adensamento por gravidade e por flotação; processos biológicos de estabilização, através de digestão aeróbia e anaeróbia ou processos químicos, através da adição de cal; e processos químicos de condicionamento para a desidratação, através de adição de cal, cloreto férrico ou polímeros que, em cada etapa, diminuem o poder de poluição do esgoto antes do retorno à natureza (FRANÇA JUNIOR, 2008).

A preocupação da sociedade com a sustentabilidade tem gerado grandes avanços tecnológicos e em pesquisas sobre a geração de energia elétrica a partir de insumos renováveis como, por exemplo, a biomassa. O tratamento de efluentes líquidos é uma das possibilidades a serem estudadas para utilização de biomassa como fonte de energia, podendo ser utilizada em conjunto com outros tipos de fontes de energia (renováveis ou não) ou, em alguns casos, como única fonte, porém não se tem atualmente dados conclusivos sobre seu real potencial de geração de energia, uma vez que faltam dados confiáveis relacionados à coleta e ao tratamento.

O biogás gerado com o processo anaeróbio do esgoto é constituído por metano na proporção de 50 a 70%, sendo que este possui um potencial de aquecimento global[1] 25 vezes maior que o dióxido de carbono, segundo dados do AR4 (*Assessment Report 4*) do IPCC em 2007 (*Intergovernmental Panel of Climate Change*), sendo necessária uma alternativa para que esse gás não seja lançado diretamente na atmosfera. Uma alternativa possível é pela queima desse gás em ciclos a gás, em motores de combustão interna, em microturbinas a gás ou inseridos em processos de cogeração, gerando assim energia elétrica que pode ser usada na própria Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) ou vendida para a concessionária, dependendo da quantidade produzida. O gás, além de gerar energia elétrica, pode ser usado para secagem do lodo e para queima nos próprios biodigestores.

1.1 OBJETIVO

É objetivo do aproveitamento energético de resíduos do processo de tratamento de esgotos obter a redução de emissão de gases que contribuem para o efeito estufa, utilizando esses gases para o aumento da eficiência energética global da ETE, viabilizando o saneamento básico e melhorando o desempenho do processo de tratamento.

Além da análise técnica, também deve ser feita uma análise econômica para a verificação da viabilidade de implantação da geração de energia elétrica. Devem ser analisados os custos de implantação do projeto e compará-los com os custos de capital, de biomassa, operação e manutenção.

O objetivo do presente trabalho é avaliar o potencial de produção de energia através do biogás produzido em estações de tratamento de esgoto, bem como os potenciais benefícios desta alternativa tecnológica. São objetivos específicos:

[1] Potencial de aquecimento global é a medida do quanto uma determinada massa de um gás de efeito estufa contribui para o aquecimento global. Essa medida é uma comparação com a mesma massa de dióxido de carbono (utilizado como referência e que possui potencial igual a 1) em um determinado período de tempo.

- Modelar ciclos térmicos de geração termelétrica e de cogeração movidos por biogás derivado do tratamento de esgotos, a partir de levantamento tecnológico;
- Avaliar o custo dos produtos energéticos gerados pelas centrais térmicas analisadas;
- Avaliar o potencial de aplicação das centrais geradoras de energia em diferentes escalas de capacidade, visando a maior sustentabilidade energética de cidades.

O texto é organizado da seguinte maneira:

- Revisão bibliográfica analisa as referências encontradas na literatura sobre o aproveitamento dos resíduos de esgotamento sanitário para geração de energia e tecnologias utilizadas para este aproveitamento;
- Embasamento teórico sobre os temas abordados neste trabalho como o esgoto e seu tratamento, o biogás e seu sistema de purificação, as tecnologias utilizadas neste trabalho, o conceito de cogeração, engenharia econômica e otimização de sistemas energéticos;
- Materiais e métodos apresentam os dados sobre tratamento de esgotos das cidades de Roseira, Guaratinguetá e Campinas a serem estudadas, dados técnicos das microturbinas Capstone e motores Jenbacher utilizados e a formulação utilizada para a modelagem neste trabalho;
- Resultados e discussão apresentam os resultados obtidos com a modelagem para diferentes cenários que avaliam a condição atual das cidades, com análise de sensibilidade ao preço de compra e venda de energia elétrica e à taxa anual de juros, e alternativas com comercialização de créditos de carbono, utilizando cargas parciais nos equipamentos e utilizando biogás de aterro em conjunto com o biogás do esgoto;
- Conclusões possíveis de serem obtidas a partir dos resultados e das discussões feitas neste trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O levantamento bibliográfico tem como objetivo identificar conhecimentos precedentes sobre o aproveitamento dos resíduos de esgoto e as tecnologias comumente utilizadas para o aproveitamento energético desta fonte, bem como determinar os valores de referência para porcentagem de metano, composição química e poder calorífico do biogás, valores estes que afetam diretamente na modelagem do ciclo térmico.

Pecora et al. (2006) desenvolveram estudo na Universidade de São Paulo (USP) por meio do Programa de Uso Racional de Energias e Fonte Alternativas (PUREFA) para verificar a possível geração de energia com o esgoto gerado no conjunto residencial e no principal restaurante do campus, com produção estimada de 5,3 m^3/dia. Para o estudo, foi utilizado um biodigestor do tipo Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente (RAFA), sistemas de purificação do biogás e, como tecnologia de conversão, um grupo motor-gerador de baixa potência (18 kW) da empresa Comercial Diesel Parts. Com o sistema em funcionamento, foram identificadas algumas dificuldades para seu uso, como vazão do biogás inconstante e pressão muito baixa e sensível, porém apresentaram uma boa opção para o uso do biogás como fonte alternativa.

Velasquez et al. (2006) desenvolveram estudo na Estação de Tratamento de Esgotos de Barueri-SP em que existe uma produção média de biogás de 24000 m^3/dia e um poder calorífico de 22,2 MJ/Nm^3. As tecnologias de conversão mais utilizadas são: motores de combustão interna operando em ciclo Otto (mais eficientes para conversão elétrica) e turbinas a gás (maior eficiência global quando se trata de cogeração), porém no estudo foi utilizada um microturbina Capstone de 30 kW (ISO) com um sistema de purificação do biogás. A purificação do biogás é de grande importância e foi feita de modo a atender os requisitos técnicos mínimos da microturbina. Com a análise econômica, observou-se que é mais viável o uso de grupos moto-geradores de 30 kW (Trigás), pois apresentam metade do custo quando comparado com microturbinas de 30 kW (Capstone), uma vez que admitem o biogás "*in natura*" não necessitando de sistema de purificação e são admitidos por aspiração, portanto reduzindo custo com compressores, porém as microturbinas são melhores do ponto de vista ambiental, já que emitem menos NOx.

Costa (2006) aprofundou o estudo apresentado por Velasquez et al. (2006) na Estação de Tratamento de Esgotos de Barueri-SP, no projeto "Ener-Biog", e fez uma comparação entre o uso de microturbinas e motores para a mesma faixa de potência de 30 kW para aproveitamento do biogás obtido com o esgotamento sanitário. Foi utilizado no estudo uma

microturbina Capstone de 30 kW (ISO) e um conjunto gerador da Trigás de 30 kW. O estudo concluiu que nas ETEs existe uma economia de 20% em relação ao consumo de energia devido ao alto consumo dos equipamentos, o que já pode ser considerado um ganho significativo, e atentou para o fato de que o biogás deve apresentar composição e características adequadas à tecnologia de conversão que vai ser empregada (no caso de microturbinas o processo de purificação do biogás tinha que ser mais rigoroso utilizando-se de um sistema de purificação e compressores que atendem as necessidades da microturbina Capstone). O estudo mostrou que as microturbinas são a melhor opção quando se analisa do ponto de vista ambiental, devido a sua baixa emissão de NOx, porém os motores são melhores do ponto de vista econômico por apresentar menor custo. O autor realizou uma análise mostrando como seria a geração de energia elétrica a partir do biogás caso fosse utilizado todo o esgoto de São Paulo e incentivou o uso deste tipo de fonte alternativa, por suas vantagens ambientais e sociais.

França Junior (2008) desenvolveu um estudo do aproveitamento energético a partir do biogás obtido com o tratamento de esgotos de uma população de um milhão de habitantes e fez uma análise técnica, econômica e termoeconômica utilizando-se do programa IPSEpro® (este programa é um software desenvolvido para criação de modelos de processo e para utilização desses modelos em análise de ciclo de vida, permitindo calcular balanço de energia, planejar modificações e melhorias em plantas existentes, monitorar processos *online* e verificar resultados) comparando um ciclo combinado com turbina a gás e turbina a vapor com um ciclo combinado com motor de combustão interna e turbina a vapor, sendo que em ambos os casos ocorre cogeração, com geração de energia elétrica e geração de vapor para ser utilizado na secagem do lodo. Chegou-se a conclusão de que, embora os custos dos equipamentos do ciclo combinado com motor de combustão interna fossem menores do que os com turbina a gás, este último era mais viável economicamente por permitir a geração de uma quantidade maior de energia elétrica, por ser mais eficiente e por gerar uma receita maior com a comercialização de créditos de carbono. No entanto, observou-se também que a planta não é autossuficiente devido ao elevado consumo de energia dos equipamentos e que não existia muita tecnologia disponível no mercado para a conversão do biogás, sendo necessária a importação das tecnologias, gerando um custo maior.

Bruno, Ortega-López e Coronas (2008) realizaram um estudo com o uso de microturbinas a gás em um sistema de trigeração, com geração de energia elétrica, calor para o processo e água resfriada. Foi feita uma análise do uso de *chillers* combinado com o uso das microturbinas, sendo que a água gelada podia ser usada tanto para condensar água no

processo de pré-tratamento do biogás quando para resfriar o ar de combustão das microturbinas. Foi feito um estudo de caso na planta de estação de tratamento de esgotos de Reus (Espanha) que produzia biogás a 105 Nm^3/h a 35 ^oC e 120 kPa, o calor obtido com a microturbina era usado para reduzir a energia gasta para aquecer os biodigestores e para produzir água gelada que resfriará o biogás e o ar de entrada da microturbina, além de obter também geração de energia elétrica. Dentre as configurações analisadas no estudo, se observou que o melhor aproveitamento era daquelas que utilizavam na planta de trigeração todo o biogás obtido no tratamento do esgoto e gás natural como adicional para atender as demandas de calor da planta, sendo que a melhor configuração era a que utilizava microturbinas com biogás e gás natural com sistema de resfriamento aproveitando gases de exaustão de duplo efeito água/LiBr conectados em paralelo.

Basrawi et al. (2012) realizaram um estudo sobre microturbinas que utilizam biogás de lodo de esgoto para geração de energia térmica e elétrica. Foram analisadas estações de tratamento de esgoto com três fatores de escala, sendo o modelo-base o que atende a 100 mil pessoas e este valor reduzido em 50% e 25%. Foram analisados três modelos de microturbinas, de 30 kW, 65 kW e 200 kW, além de combinações entre eles, três condições de temperatura: baixa, média e alta, além de trabalhar com cargas parciais nas microturbinas. Foi feita uma modelagem para as diferentes configurações analisando-se a eficiência elétrica, capacidade de atendimento da demanda térmica durante o ano e capacidade de aproveitamento do biogás. Observou-se que as modelagens com a microturbina de 200 kW e a combinação com diferentes saídas são as que apresentam maior eficiência elétrica quando a demanda térmica não varia muito ao longo do ano. As combinações com diferentes saídas podem aproveitar mais do que 40% do biogás para energia térmica e elétrica em qualquer situação. Quando a demanda térmica varia muito ao longo do ano, cargas parciais são comumente usadas e a eficiência elétrica sofre redução.

Tyagi e Lo (2013) realizaram um estudo mostrando as várias opções para aproveitamento do lodo de esgoto obtido nas Estações de Tratamento de Esgoto, como a biodigestão anaeróbia, a incineração, a gaseificação, a pirólise, a oxidação em ar úmido (*Wet Air Oxidation*), a oxidação supercrítica (*SuperCritical Water Oxidation*) e o tratamento hidrotérmico. Observou-se que o biogás gerado com a biodigestão anaeróbia contém entre 60% e 70% de metano e que, na maioria das Estações de Tratamento de Esgoto, este metano é usado como combustível em motores a gás, produzindo energia elétrica e térmica para uso na própria Estação de Tratamento. Foi observado que em uma Estação de Tratamento de Esgotos, cerca de 80% do custo total da sua operação é devido ao custo de eletricidade

utilizada nos processos de tratamento, porém o aproveitamento do metano do biogás para geração de energia pode cobrir metade desse custo, ou seja, a geração de energia com o aproveitamento do metano geraria uma economia de 40% do custo total de operação de uma Estação de Tratamento de Esgotos. No estudo, analisou-se que se todas as 544 ETEs dos EUA aproveitassem o biogás do lodo de esgoto para geração de energia elétrica, seriam gerados cerca 340 MW, o suficiente para suprir 261000 casas. Foram analisados, também, outros destinos possíveis para o aproveitamento do lodo de esgoto, como recuperação dos nutrientes, utilização para produção de biocombustíveis (hidrogênio, gás de síntese, bio-óleo e biodiesel), de materiais de construção, de bioplásticos, de biosolventes, de biopesticidas, como combustível em célula combustível e como biofertilizante.

Branco (2013) desenvolveu uma análise do tratamento de esgotos da rede coletora da Cooperativa dos Plantadores de cana do Oeste do Estado de São Paulo (Coopercana) por meio de biodigestão anaeróbia visando reciclagem energética e orgânica das águas residuárias humanas. A análise foi feita na cooperativa que conta com 150 funcionários e por um período de 18 semanas. Observou-se uma produção constante de biogás no período de estudo, composto, na média, por 73% de metano e 10 % de dióxido de carbono.

Chen e Chen (2013) realizaram um estudo energético e ambiental através de análise de ciclo de vida (LCA) sobre a utilização de biogás de esgoto doméstico e aproveitamento do lodo de esgoto. Foram analisadas oito configurações possíveis: utilizando o biogás somente para aquecimento e sem aplicações para o lodo, utilizando o biogás dessulfurado para fins domésticos e o lodo enviado para aterro, utilizando o biogás para aquecimento e o lodo seco para incineração, utilizando biogás para geração de calor e potência e o lodo seco para incineração, utilizando processamento de nutrientes do lodo conectado com geração de calor e potência do biogás, utilizando processamento de nutrientes do lodo conectado com utilização do biogás para fins domésticos, utilizando processamento de nutrientes e incineração do lodo conectado com geração de calor e potência do biogás e utilizando processamento de nutrientes e incineração do lodo conectado com utilização do biogás para fins domésticos. Como resultado obtiveram que a utilização do biogás para fins domésticos e processamento de nutrientes do lodo são as melhores alternativas entre as analisadas e que o reuso do biogás e processamento do lodo podem até mesmo suprir os custos de instalação e operação da estação de tratamento de esgotos.

Kothari et al. (2014) realizaram um estudo sobre a digestão anaeróbia seca, analisando os diferentes aspectos que interferem nesse tipo de biodigestão. Foram observados alguns parâmetros que influenciam diretamente na produção do biogás como: temperatura (que

também depende do tipo de bactéria que está realizando a biodigestão, sendo a mais popular a mesofílica com temperatura de 35°C, embora a termofílica apresente uma produção maior com temperatura de 55°C), razão entre carbono e nitrogênio (deve ser em torno de 20 a 30, com razão ótima de 25), pH (varia conforme o processo de digestão, sendo 5,5 para hidrólise, 6,5 para acidogênese e entre 6,5 e 8,2 para metanogênese), tempo de retenção (depende da temperatura e da composição do lodo, para condições mesofílicas varia de 10 a 40 dias e para condições termofílicas em torno de 14 dias) e razão de capacidade orgânica (capacidade do sistema de digestão anaeróbia para conversão biológica). Foi encontrado em estudo que a composição aproximada do biogás gerado é 60% de metano, 35% de dióxido de carbono, 1,67% de água, 1,67% de amônia e 1,67% de gás sulfídrico.

Aguilar-Virgen et al. (2014) realizaram um estudo sobre geração de biogás em aterros sanitários no México, analisando composição e utilização como combustível para geração de energia. Na análise da geração de energia com o biogás fizeram uma comparação entre diferentes tecnologias e suas vantagens e desvantagens. Os autores indicam os motores de combustão interna como a tecnologia mais utilizada para geração de energia, sendo primariamente utilizados em lugares em que a produção de biogás pode gerar de 0,1 a 3 MW ou em que a vazão de biogás para os motores seja de 30 a 2000 m^3/h com 50% de CH_4, aproximadamente, e são vantagens dessa tecnologia o baixo custo capital, alta eficiência e adaptabilidade às variações de biogás. As turbinas são apresentadas como tecnologia alternativa aos motores, sendo usadas onde a produção de biogás possa gerar pelo menos 3MW ou a vazão de biogás para a turbina seja maior do que 1784 m^3/h com 50% CH_4, quando comparadas com os motores, as turbinas possuem vantagens como maior resistência à corrosão, tamanho relativamente compacto e menores custos de operação e manutenção, porém quando comparadas com outras opções de geração, necessitam de energia adicional para o sistema de compressão. As microturbinas são apresentadas como uma alternativa para pequena escala, com aplicações menores do que 1 MW e vazão de biogás menor do que 595m^3/h com 50% CH_4, além de requerer tratamento de remoção de contaminantes do biogás. Ainda apresentam como tecnologia a célula combustível, que têm uma eficiência elevada e sem gerar NO_x, CO e SO_x, mas que requerem uma exigente limpeza do gás.

Yingjian et al. (2014) realizaram uma análise da utilização de biogás em motores de combustão interna. Os autores destacam a importância do enriquecimento de metano e eliminação de poluentes do biogás, como CO_2 e H_2S, sendo que, após essa eliminação, o biogás pode ter valor térmico equivalente ao do gás natural. As análises foram feitas em um processo de tratamento de esgotos que produz de 60 a 100 m^3/h de biogás. Como resultados

obtiveram uma geração de eletricidade de 70 kW com 34,84 m^3/h de biogás e eficiência energética de 28,45%. Com relação a energia térmica, foram dissipadas 40,34% na exaustão, 26,86% na água da jaqueta do cilindro e 2,99% por radiação e convecção. Uma alternativa apresentada para aumentar a eficiência é o aproveitamento do calor dos gases de exaustão e da água aquecida da jaqueta do cilindro.

Mills et al. (2014) realizaram um estudo no Reino Unido comparando diferentes configurações tecnológicas para a geração de energia a partir do lodo de esgoto. As configurações analisadas são utilizando digestor anaeróbio convencional com ciclo de geração de energia térmica e elétrica (com motores e aproveitamento do calor dos gases de exaustão e da água aquecida da jaqueta do cilindro), digestor anaeróbio com processo de hidrólise térmica (neste processo o lodo é submetido à alta temperatura, 165 ^oC, e pressão de 700 kPa, por 30 minutos para solubilização antes de ser enviado para o digestor convencional) com ciclo de geração de energia térmica e elétrica, digestor anaeróbio com processo de hidrólise térmica com injeção de biometano, digestor anaeróbio com processo de hidrólise térmica com ciclo de geração de energia térmica e elétrica seguido de secagem do lodo para produção de combustível sólido e digestor anaeróbio com processo de hidrólise térmica seguido de secagem e pirólise do lodo para utilização do biogás e do gás de pirólise no ciclo de geração de energia térmica e elétrica. Os autores realizaram uma análise do ciclo de vida (LCA) econômica e ambiental e chegaram à conclusão de que a opção em que ocorre a secagem do lodo para geração de combustível sólido é a mais sustentável, seguida de opção em que existe a pirólise do lodo.

Khan et al. (2014) realizaram uma análise energética e econômica sobre a capacidade de poligeração utilizando biogás na zona rural de Bangladesh. O estudo foi feito utilizando como entrada esterco de gado e água contaminada, utilizando biodigestor, motor de combustão interna de 10 kW e membrana de destilação *air-gap* (tecnologia utilizada para purificação da água que consiste em duas superfícies separadas por uma membrana, em que a água contaminada, principalmente com arsênio e materiais pesados, é aquecida em uma das superfícies e flui através de uma camada de ar úmido pela membrana, e se condensa na outra superfície já sem os contaminantes) e resultando em geração de energia elétrica, biogás para cozinhar, purificação de água e fertilizante. Como resultado obtiveram que o sistema de poligeração é muito competitivo, sendo 12 vezes mais viável do que a utilização de painéis solares ou turbinas eólicas, apresenta baixos custos para a obtenção dos produtos e possui um feedback de 2,6 a 4 anos, porém, como muitos dos equipamentos ainda não são disponíveis comercialmente, o custo de investimento é maior do que o analisado, se tornando a maior

barreira à implantação da poligeração, além de que é possível que haja barreiras sociais, institucionais e financeiras para a implantação em outras áreas.

Basrawi, Ibrahim e Yamada (2015) investigaram o tamanho ótimo para uma microturbina, analisando três tipos de microturbinas para geração de energia a partir de biogás de uma planta de tratamento de esgotos de Hokkaido (Japão): 30, 65 e 200 kW, e realizando análise energética e econômica empregando Valor Presente Líquido. Os autores apresentam como vantagens das microturbinas sua flexibilidade com o combustível, pouca manutenção e baixas emissões. A análise é feita porque diferentes tamanhos de microturbinas apresentam diferentes performances e custo capital, sendo que quanto maior o tamanho, maior é a eficiência e menor é o custo, então é melhor uma única microturbina maior do que uma combinação de várias menores, porém se for necessário utilizar a turbina maior com carga parcial a eficiência diminui drasticamente. Como resultado do estudo obtiveram que a pior performance econômica é da microturbina de 30 kW e que a melhor performance é a da microturbina de 200 kW, mesmo que ela opere com cargas parciais. Foi também analisada uma possível combinação de todas as turbinas, o que resultou em uma boa eficiência com cargas parciais, porém com custo mais elevado do que nos outros casos.

Santos, Barros e Filho (2016) realizaram uma análise de viabilidade econômica e potencial de geração de energia elétrica utilizando biogás de estações de tratamento de esgotos no Brasil. Foi observado que o tamanho da população contribui para a viabilidade econômica da geração de energia nas estações. Foram utilizados o tamanho da população e as projeções de consumo de energia no Brasil para análise do potencial máximo de produção das plantas utilizando biogás. Os resultados indicaram viabilidade econômica somente para cidades com população acima de 300 mil habitantes e que as plantas de geração de energia poderiam produzir cerca de 1 TWh de energia elétrica até 2040, sendo que estes resultados seriam mais promissores se houvesse viabilidade econômica para as cidades com porte menor.

3 EMBASAMENTO TEÓRICO

3.1. ESGOTOS

Segundo a NBR 9648 (ABNT, 1986), esgoto sanitário é o despejo líquido constituído de esgotos doméstico e industrial, água de infiltração e a contribuição pluvial parasitária. Esgoto doméstico é o despejo líquido resultante do uso da água para higiene e necessidades fisiológicas humanas. Esgoto industrial é o despejo líquido resultante dos processos industriais, respeitados os padrões de lançamento estabelecidos. Água de infiltração é toda água, proveniente do subsolo, indesejável ao sistema separador e que penetra nas canalizações. Contribuição pluvial parasitária é a parcela de deflúvio superficial inevitavelmente absorvida pela rede coletora de esgoto sanitário.

Segundo Costa (2006), os esgotos são constituídos por quatro grupos principais: matéria orgânica, organismos patogênicos, nutrientes e materiais em suspensão. Devido a sua constituição, os esgotos não podem ser despejados diretamente no meio ambiente, necessitando passar primeiramente por um processo de tratamento que objetiva corrigir as características indesejáveis de modo que possam ser despejados sem causar impactos e dentro das normas regulamentadoras.

3.2. PROCESSO DE TRATAMENTO DE ESGOTOS E SUA IMPORTÂNCIA

O processo de tratamento de esgoto consiste das seguintes etapas (COSTA, 2006):

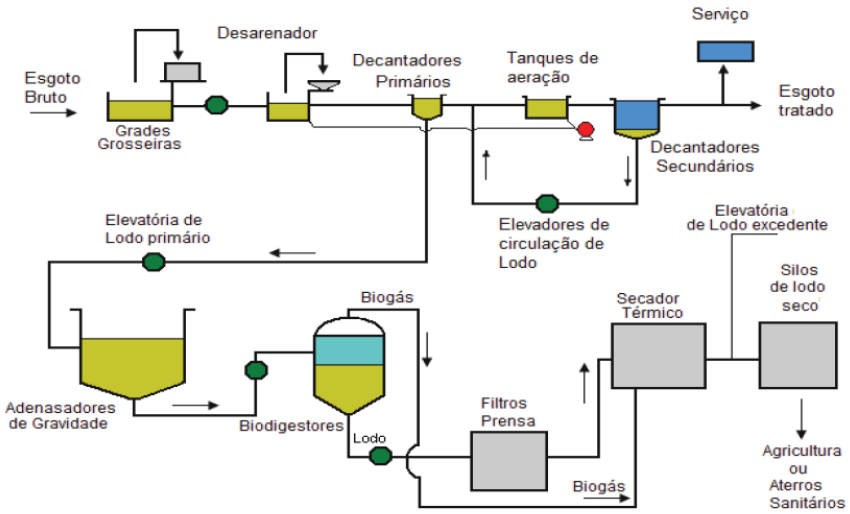
- Através de um sistema de “gradeamento” detêm-se sólidos de tamanhos maiores que existam no esgoto, tais como galhos e outros objetos, que podem ter sido jogados intencionalmente ou arrastados pela água;
- Para retirada dos sólidos granulares o esgoto passa por um sistema de “caixas de areia”;
- Nos decantadores primários os materiais sólidos ainda existentes sedimentam no fundo do tanque, porém algumas partículas são tão pequenas e leves que não conseguem sedimentar sozinhas, sendo então necessário acrescentar uma substância coagulante, a fim de que essas partículas menores se juntem e consigam por fim sedimentar. Esse resíduo sedimentado é o chamado “lodo de esgoto”;
- No desarenador e nos tanques de aeração existem compressores que são utilizados

para produzir ar sob pressão para oxigenação por meio de aeração, ou seja, devolve à água o oxigênio perdido, soprando ar dentro do efluente, melhorando assim a qualidade da água;

- O lodo de esgoto é retirado do tanque é encaminhado para adensadores por gravidade e digestores anaeróbios, onde sofrem redução de 35-45% dos seus sólidos voláteis, sendo, então, desidratado e encaminhado para filtros prensas para que reduções maiores de volume ocorram. Ao término dessas etapas o lodo pode ser encaminhado para a agricultura para sua utilização como fertilizante, quando permitido, ou para aterros sanitários. Nos digestores é que ocorre a produção de biogás através da decomposição da matéria orgânica pelas bactérias anaeróbias, sendo que este biogás pode ser utilizado como combustível para geração de energia ou para secagem do lodo na própria estação de tratamento. Vale ressaltar que, segundo Van Haandel (1994), é mais interessante se utilizar processos anaeróbios para decomposição do lodo do que aeróbios, uma vez que geram menor volume de lodo (97% do aeróbio contra 30% do anaeróbio) além de geração de energia com a produção de biogás;
- A água resultante do tratamento pode ser utilizada para fins não nobres, como industriais, ou descartada diretamente nos rios.

A Figura 1 apresenta as etapas de tratamento do esgoto dentro de uma estação de tratamento, desde a chegada do esgoto bruto até o retorno do esgoto já tratado para os rios e utilização do lodo para agricultura ou aterro sanitário.

Figura 1 - Etapas de tratamento de esgoto



Fonte: França Junior (2008)

A falta de tratamento de esgoto pode levar a ocorrência de várias doenças, como ancilostomíase, ascaridíase, amebíase, cólera, diarreia infecciosa, disenteria bacilar, esquistossomose, estrongiloidíase, febre tifoide, febre paratifoide, salmonelose, teníase, cisticercose e entre outras. Segundo o Manual de Saneamento (FUNASA, 2004), a cada R$1,00 (um real) investido em saneamento, economizam-se R$ 4,00 (quatro reais) em medicina curativa. Portanto, o tratamento do esgoto é importante para a saúde pública, pois evita a contaminação e transmissão de doenças.

3.3. BIOGÁS

O biogás é o produto da biodigestão de compostos orgânicos, sendo que o biodigestor é o sistema utilizado para sua produção, que se constitui de uma mistura de gases combustíveis, cujo principal gás é o metano (CH_4), produzido por bactérias que digerem matéria orgânica em condições anaeróbias (isto é, em ausência de oxigênio) na degradação de polímeros orgânicos derivados de matéria biodegradável, como; resíduos alimentícios, lodo de esgoto, lixo doméstico, substrato da cana-de-açúcar, vinhaça, esterco orgânico, plantas aquáticas, efluentes industriais e demais resíduos agrícolas. Nesse caso, quando a digestão anaeróbia é realizada em biodigestores especialmente planejados, a mistura gasosa produzida pode ser usada como combustível, o qual, além de não produzir gases tóxicos durante a queima e de ser uma ótima alternativa para o aproveitamento do lixo orgânico, ainda deixa como resíduo um lodo que é um excelente biofertilizante (COLLARES PEREIRA, 1998).

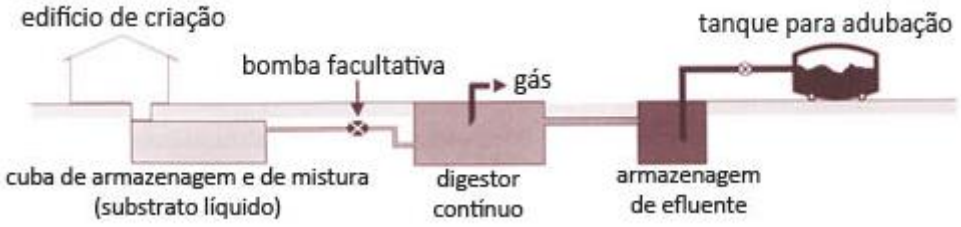
Biogás é uma mistura gasosa, combustível, resultado da fermentação de matéria orgânica por bactérias anaeróbias. A composição do gás depende da composição da matéria orgânica fermentada e do tipo de biodigestor utilizado, porém é essencialmente constituída de metano (CH_4) e dióxido de carbono (CO_2), sendo que o poder calorífico do biogás depende da quantidade de metano existente na composição, sendo estes valores diretamente relacionados.

3.4. BIODIGESTORES CONTÍNUOS E DESCONTÍNUOS

Existem basicamente dois tipos de biodigestores: os contínuos e descontínuos. Segundo Costa (2006), em um sistema contínuo, a matéria orgânica é introduzida na cuba de fermentação, com uma determinada taxa de diluição (a qual depende do tipo de matéria orgânica a fermentar), onde fica retida durante vários dias. O tempo de retenção resulta de um compromisso entre o volume de gás a produzir, o grau de digestão que se pretende e a

temperatura de funcionamento. Depois de carregada a cuba e iniciada a fermentação, impõe-se a estabilização do sistema. É imperativa a verificação de todos os parâmetros como o pH, temperatura, qualidade do efluente, produção e qualidade do gás. A Figura 2 apresenta um esquema com utilização de biodigestor contínuo.

Figura 2 – Biodigestor contínuo



Fonte: Salomon e Filho (2007)

Ao contrário do sistema contínuo, o funcionamento do sistema descontínuo não é regular, assim, a cuba de fermentação é totalmente carregada periodicamente. Neste processo, o fator diluição não é considerado um problema, já que a matéria orgânica é fermentada praticamente sem adição de água. O processo inicia-se com uma fase de fermentação aeróbia que permite a degradação das moléculas pouco polimerizadas e que podem ser um fator de acidificação do meio. A duração desta fermentação é de 2 a 8 dias, seguindo-se a fermentação anaeróbia durante um período de 30 a 40 dias. Se houver problemas durante o processo, a melhor opção é começar novamente. No entanto, a experiência, segundo Costa (2006), diz que se trata de um processo simples, que normalmente funciona bem. A produção de gás é irregular e o volume produzido é da ordem dos 60 m^3 por tonelada de matéria bruta. A Figura 3 apresenta um esquema de funcionamento de um biodigestor descontínuo.

Figura 3 – Biodigestor descontínuo



Fonte: Salomon e Filho (2007)

Segundo Kothari et al. (2014) dentre alguns parâmetros que influenciam na produção do biogás está a temperatura, esta depende do tipo de bactéria que está realizando a biodigestão,

sendo que a mais popular é a bactéria mesofílica com temperatura de 35°C, valor este adotado como referência para este trabalho.

3.5. PURIFICAÇÃO DO BIOGÁS

O biogás produzido deve passar por um processo de purificação, principalmente caso venha a ser usado posteriormente em um sistema de conversão em energia elétrica, com o objetivo de aumentar seu poder calorífico com a retirada da água e gás carbônico presentes na mistura, além da retirada do gás sulfídrico que é altamente corrosivo e afeta o rendimento e a vida útil dos equipamentos.

A Tabela 1 apresenta os componentes comumente encontrados no biogás, seus conteúdos e efeitos na composição, mostrando porque a purificação é necessária.

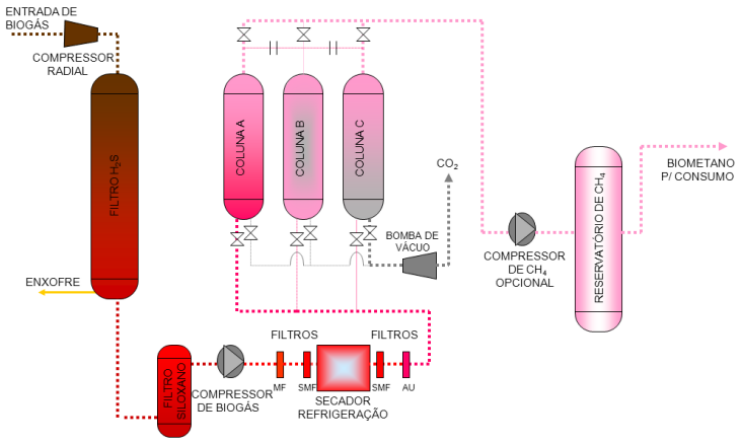
Tabela 1 - Componentes do biogás e seus efeitos

Componente	Conteúdo	Efeito
CH_4	50 – 75 Vol. - %	Componente inflamável
CO_2	5 – 50 Vol. - %	Reduz o valor energético e ignição
		Promove corrosão
		Nocivo para a célula de combustível alcalina
H_2S	0 – 5000 ppm V	Corrosão em agregados e tubulações
		Emissões de SO_2 depois da combustão
NH_3	0 – 500 ppm V	Reduz ignição
		Nocivo para a célula de combustível
		Emissões de NO_x depois da combustão
Vapor de água	1 – 5 Vol. - %	Corrosão em agregados e tubulações
		Condensado danifica instrumentos e agregados
		Na geada, perigo de congelamento
Partículas de poeira	> 5 µm	Jatos obstruídos
		Danifica célula de combustível
N_2	0,5 Vol. - %	Reduz o valor energético e ignição

Fonte: Comgás (2016)

Geralmente esse sistema de purificação é composto por dois compartimentos instalados na linha de captação do gás. Antes de o biogás ser alimentado neste sistema, passa por um recipiente onde fica retida a água condensada durante sua passagem pela tubulação. O primeiro compartimento é composto por dois tipos de peneira molecular, uma delas visa à retirada da umidade e a outra a retirada do ácido sulfídrico (H_2S), sílica gel azul, utilizada como indicador, pois quando saturada, forma uma coloração diferente. O segundo contém cavaco de ferro, visando assegurar a retirada de H_2S, que possivelmente não tenha reagido com o primeiro elemento. A eficiência de um sistema de purificação se comprova pelo decréscimo significativo das concentrações do sulfeto de hidrogênio e água (PECORA, 2006). A Figura 4 apresenta um esquema de purificação de biogás desde a entrada do biogás vindo dos biodigestores até a retirada do biogás pronto para consumo.

Figura 4 – Sistema de purificação de biogás



Fonte: Pergher (2015)

Após a purificação do biogás, este pode ser queimado em queimadores convencionais, conhecidos como *flares*, ou pode ser utilizado para geração de energia elétrica e energia térmica, ambas podendo ser utilizadas pelos próprios biodigestores que produzem o biogás.

3.6. TECNOLOGIAS DE APROVEITAMENTO DO BIOGÁS

O aproveitamento energético do biogás é interessante do ponto de vista estratégico, econômico e ambiental. Do ponto de vista estratégico, por permitir uma geração de energia descentralizada, não necessitando de linhas de transmissão por estar próximo do ponto de uso da energia. Do ponto de vista econômico, por se tratar de um combustível obtido a partir de um resíduo disponível no local e de baixo custo por se tratar de resíduo do processo de

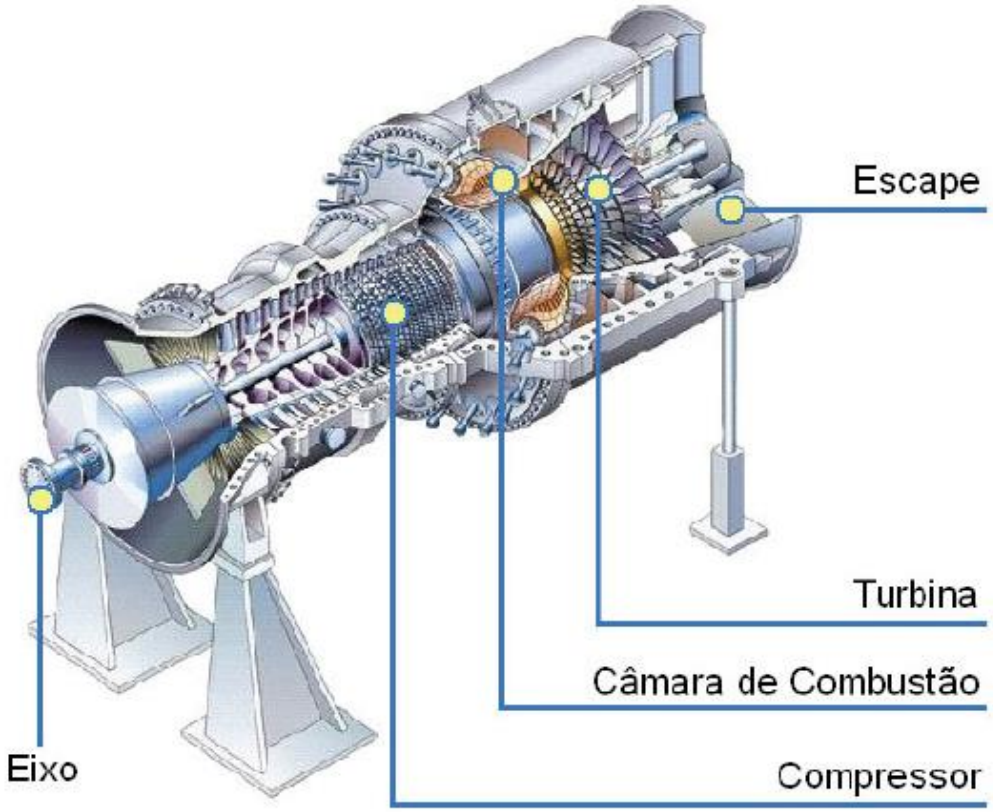
tratamento de esgotos. Do ponto de vista ambiental pode-se observar que o combustível, por se tratar de biogás, é renovável, com menor emissão de poluentes e que se utilizado para geração de energia ao invés de ser queimado diretamente na natureza reduz as emissões de carbono para a atmosfera e, assim, reduz o efeito estufa.

Para este aproveitamento são utilizados alguns equipamentos que permitem a conversão da energia química do combustível (biogás) em energia mecânica, térmica ou elétrica. As tecnologias comumente encontradas são as turbinas a gás, microturbinas a gás e motores de combustão interna.

3.6.1. Turbinas e microturbinas a gás

As turbinas a gás são constituídas pelo compressor, pela câmara de combustão e pela turbina de expansão propriamente dita, como se pode observar na Figura 5.

Figura 5 – Turbina a gás



Fonte: França Junior (2008)

Primeiro o ar é comprimido pelo compressor de modo a elevar sua pressão, posteriormente esse ar comprimido é inserido junto com o combustível na câmara de

combustão. Essa mistura de ar e combustível é queimada em regime contínuo de modo que a energia química do combustível se transfere para os gases, elevando a temperatura destes. Esses gases provenientes da combustão na câmara são expandidos na turbina e transformam sua energia térmica em energia mecânica, sendo que parte dessa energia é utilizada para acionar o compressor acoplado no mesmo eixo que a turbina e o restante da energia pode ser utilizado para geração de energia elétrica se for acoplado um gerador no eixo da turbina.

Quanto maior for a temperatura e a pressão dos gases na entrada da turbina e menor for a temperatura dos gases na saída da mesma, maior será a eficiência dessa turbina.

As turbinas a gás estão disponíveis no mercado desde centenas de kW até 300 MW.

As microturbinas a gás funcionam segundo o mesmo princípio das turbinas a gás, porém possuem uma faixa de operação menor, chegando a 250 kW, sendo que de 250 a 1000 kW já pode ser consideradas mini turbinas.

No caso do biogás gerado em Estações de Tratamento de Esgotos, por possuírem uma pressão baixa, pode ser necessário que se adicione um compressor ao conjunto, caso a pressão de alimentação do combustível não seja suficiente.

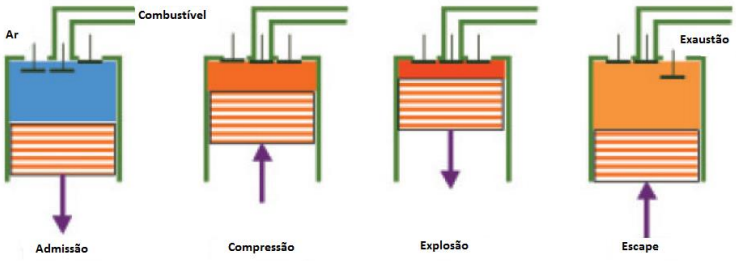
3.6.2. Motores de combustão interna

Os motores podem operar segundo dois ciclos: Diesel e Otto, no ciclo Diesel a combustão ocorre pela compressão do combustível na câmara de combustão e no ciclo Otto a combustão ocorre pela explosão do combustível por meio de uma fagulha na câmara.

Os motores podem operar com combustíveis líquidos, gasosos ou uma mistura de combustíveis líquidos e gasosos. Para utilização de combustíveis gasosos (como é o caso deste trabalho, que utiliza o biogás) o ciclo Otto é mais recomendado.

O ciclo Otto funciona conforme apresentado na Figura 6. A válvula de entrada de ar abre para permitir a entrada de ar misturado com combustível no cilindro (admissão). O pistão sobe e comprime essa mistura (compressão). A vela dá ignição na mistura do cilindro (explosão) e a força da explosão é transferida ao pistão. A válvula de escape abre no tempo preciso para permitir que os gases deixem o cilindro (escape). O pistão possui um movimento periódico e que ocorre com tempo preciso em cada uma das etapas. A força do pistão é transferida através da manivela para o eixo de transmissão.

Figura 6 – Funcionamento de um motor em ciclo Otto



Fonte: Costa (2006)

3.7. COGERAÇÃO

A cogeração consiste no aproveitamento da energia térmica de um combustível na forma de mais de uma energia útil. As formas mais comuns de energia útil são a energia térmica e mecânica. A energia mecânica pode ser utilizada para geração de energia elétrica desde que acoplado um gerador ao eixo de transmissão ou diretamente para acionamento de equipamentos. A energia térmica normalmente é utilizada para geração de vapor, calor ou resfriamento para processos dentro de uma determinada planta.

A cogeração pode ser classificada segundo dois grandes grupos: *bottoming* e *topping*. Cogeração *bottoming* ocorre quando o processo utiliza energia a temperaturas mais elevadas e energia de cogeração é o resultado da recuperação do calor residual do processo, ou seja, o foco é a geração de energia térmica, sendo a energia elétrica um adicional. Cogeração *topping* é quando a energia utilizada é extraída no nível mais alto da temperatura de combustão e a energia de cogeração no nível mais baixo, ou seja, o foco é a geração de energia elétrica, sendo a energia térmica um adicional.

Neste trabalho consideraremos a operação em cogeração com enfoque na geração de energia elétrica e aproveitamento dos gases de exaustão para se obter energia térmica.

3.8. ENGENHARIA ECONÔMICA

Segundo Pamplona e Montevechi (2006), após um projeto estar tecnicamente correto é necessário analisar seus aspectos econômicos. A engenharia econômica fornece os critérios de decisão, para a escolha entre as alternativas de investimento. Três métodos de avaliação formam a base da engenharia econômica e são eles: método do valor presente líquido (VPL), método do valor anual uniforme (VA), e método da taxa interna de retorno (TIR). Estes

métodos são equivalentes e indicam sempre a mesma alternativa de investimento, que é a melhor do ponto de vista econômico.

A taxa mínima de atratividade (TMA) é a taxa a partir da qual o investidor considera que está obtendo ganhos financeiros. Alguns autores afirmam que a taxa de juros a ser usada pela engenharia econômica é a taxa de juros equivalente à maior rentabilidade das aplicações correntes e de pouco risco. Uma proposta de investimento, para ser atrativa, deve render, no mínimo, esta taxa de juros.

O método do valor presente líquido caracteriza-se, essencialmente, pela transferência para o instante presente de todas as variações de caixa esperadas, descontadas à taxa mínima de atratividade. Em outras palavras, seria o transporte para a data zero de um diagrama de fluxos de caixa, de todos os recebimentos e desembolsos esperados, descontados à taxa de juros considerada. Se o valor presente for positivo, a proposta de investimento é atrativa, e quanto maior o valor positivo, mais atrativa é a proposta.

O método do valor anual caracteriza-se pela transformação de todos os fluxos de caixa do projeto considerado, numa série uniforme de pagamentos, indicando desta forma o valor do benefício líquido, por período, oferecido pela alternativa de investimento. Como geralmente, em estudos de engenharia econômica a dimensão do período considerado possui magnitude anual, foi convencionada a adoção da terminologia “valor anual”. O projeto em análise só será atrativo se apresentar um benefício líquido anual positivo, e entre vários projetos, aquele de maior benefício positivo será o mais interessante.

A taxa interna de retorno de um projeto é a taxa de juros para a qual o valor presente das receitas torna-se igual aos desembolsos. Isto significa dizer que a TIR é aquela que torna nulo o valor presente líquido do projeto. Pode ainda ser entendida como a taxa de remuneração do capital. A TIR deve ser comparada com a TMA para a conclusão a respeito da aceitação ou não do projeto. Uma TIR maior que a TMA indica projeto atrativo. Se a TIR é menor que a TMA, o projeto analisado passa a não ser mais interessante. O cálculo da TIR é feito normalmente pelo processo de tentativa e erro.

Em engenharia econômica, para análise de viabilidade de um projeto devem-se levar em consideração os seguintes valores: investimento fixo (composto por equipamentos, terrenos, construções civis, instalações industriais, móveis, etc.) e investimento em giro (capital de giro necessário para por em marcha a empresa, ou seja, disponibilidades, estoques e os recursos necessários para sustentar as vendas a prazo), custos de produção variáveis (aqueles que variam de acordo com a quantidade produzida, por exemplo, matérias primas, consumo de energia elétrica e combustível), custos de produção fixos (normalmente não variam

proporcionalmente à produção, por exemplo, manutenção, seguros e consumo de energia elétrica), despesas gerais (aquelas que, mesmo importantes para a operação, não fazem parte da fabricação de um produto), outras despesas e desembolsos depreciação contábil e receitas operacionais (produto da quantidade produzida pelo preço).

3.9. OTIMIZAÇÃO DE SISTEMAS ENERGÉTICOS

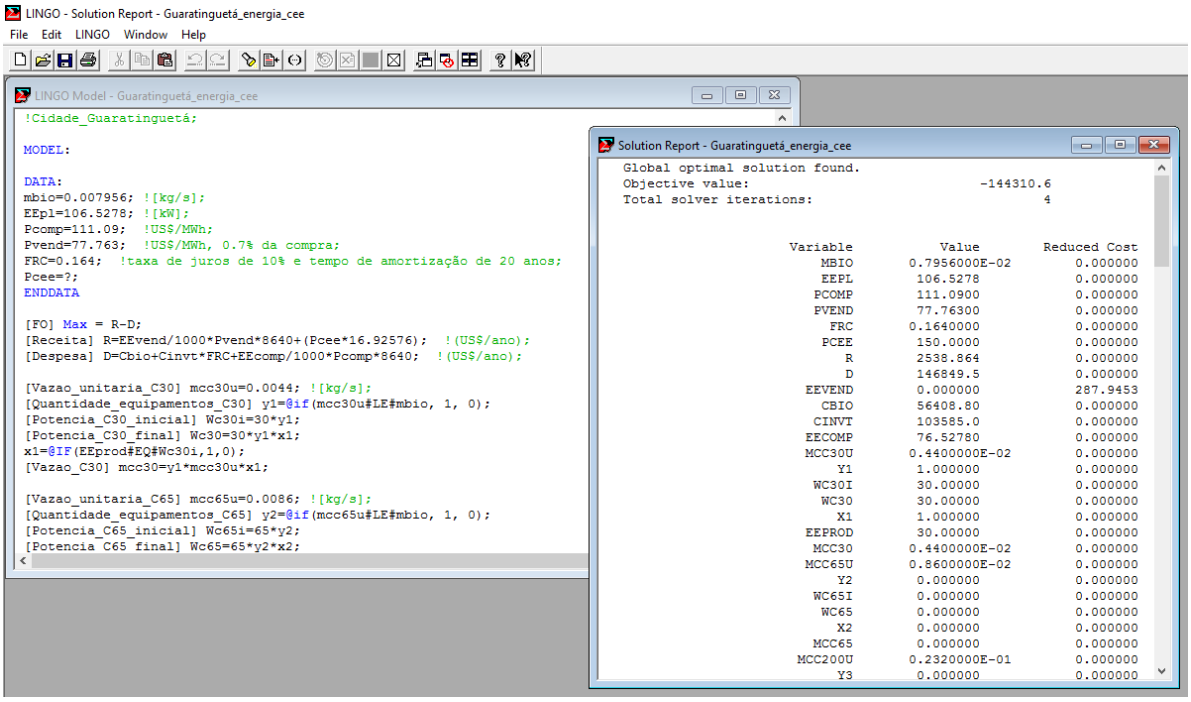
A otimização consiste em procurar o melhor valor para uma determinada quantidade, podendo esse valor ser o mínimo ou o máximo. Inicialmente tem-se uma superestrutura, que são todas as opções possíveis de equipamentos e arranjos para um determinado processo. Dependendo do que se almeja com o processo, define-se o alvo da otimização, ou seja, qual valor deverá ser o máximo ou o mínimo (este valor pode estar relacionado com aspectos técnicos, econômicos e ambientais), por exemplo, máximo lucro, mínima emissão de poluentes e máxima geração de energia. Tendo-se a quantidade a ser otimizada, devem-se observar as restrições e limitações dos equipamentos e processos (tendo em vista limites operacionais, tecnológicos e disponibilidade), por exemplo, necessidade de combustível para um equipamento, eficiência de um equipamento e disponibilidade de energia. Após as restrições, são feitas análises técnicas e econômicas nos equipamentos, referentes à produção ou absorção de energia e calor e aos custos envolvidos no processo.

Existem métodos para analisar a otimização de um sistema e o utilizado nesse trabalho é a programação linear. Nesse método, a função objetivo (a ser otimizada visando o valor máximo ou mínimo) e as restrições são descritas como funções lineares. Aplica-se então o quadro Simplex para obtenção do valor ótimo. O quadro Simplex é um algoritmo que automatiza a busca pelo ponto ótimo. Nesse quadro têm-se as funções de restrições (que são inequações) adicionadas algumas variáveis de folga que permitem obter igualdades a partir das inequações, com isso monta-se uma matriz com variáveis básicas (existentes), variáveis não básicas (de folga e que deverão desaparecer ao final da otimização) e a função objetivo e testa se a solução encontrada é a ótima, até se obter este resultado, sendo que quando o ótimo é o valor máximo as variáveis básicas da função objetivo devem ser positivas e quando o ótimo é o valor mínimo as variáveis básicas da função objetivo devem ser negativas.

Pode-se também ser feita análise de sensibilidade com a programação linear e essa consiste em verificar o comportamento da função objetivo e da superestrutura ao variar alguns parâmetros.

A otimização pode ser feita por softwares existentes no mercado, entre eles: Excel, MatLab e Lingo, tendo sido este último o utilizado nesse trabalho, conforme apresentado na Figura 7.

Figura 7 – Otimização com software



Fonte: Autora

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. GERAÇÃO DO BIOGÁS

A modelagem dos ciclos térmicos é feita utilizando como combustível o biogás proveniente de estações de tratamento de esgotos. Segundo Branco (2013), a composição média do biogás é de 73% de metano, 10% de CO_2 e 17% de outros gases. Segundo Costa (2006), para 75% de metano e 25% de CO_2, tem-se o biogás com peso específico de 1,0268 kg/Nm^3 e PCI de 26137,58 kJ/kg, portanto para efeitos de cálculos e considerando as estimativas de Costa (2006) e Branco (2013) próximas, neste trabalho serão adotados os valores indicados por Costa (2006).

Na modelagem dos ciclos térmicos, são analisados os resultados para três municípios distintos, sendo eles Roseira, Guaratinguetá e Campinas, todos no estado de São Paulo, de modo a ilustrar a viabilidade técnica e econômica da tecnologia em estudo com relação à dimensão da população em uma escala na qual Roseira é referência para aproximadamente 10 mil, Guaratinguetá para 100 mil e Campinas para 1 milhão de habitantes. A Tabela 2 apresenta os dados de população atendida, volume tratado de esgoto e energia consumida na estação de tratamento de esgoto para os municípios citados, segundo Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento - SNIS (2013).

Tabela 2 - Dados das estações de tratamento de esgotos dos municípios estudados

Município	População atendida	Volume tratado (m^3/ano)	Energia consumida (kWh/ano)
Campinas	992873	44596220	26440020
Guaratinguetá	108249	1410220	920400
Roseira	9139	361450	133270

Fonte: SNIS (2013)

Segundo França Junior (2008), a taxa média de geração de biogás é de 170,9 m^3 de biogás para cada 1000 m^3 de esgoto tratado, portanto, podem-se calcular assim os valores de biogás obtidos para cada um dos municípios com a equação (1):

$$m_{biogás} = tx_{biogás}.m_{esgoto} \quad (1)$$

Em que:

$m_{biogás}$ = volume de biogás gerado [m^3/ano]

$tx_{biogás}$ = taxa média de geração de biogás [= 0,1079 m^3 biogás/m^3 esgoto]

m_{esgoto} = volume de esgoto tratado [m^3/ano]

Como o resultado encontrado com a equação (1) é obtido em [m^3/ano], utiliza-se a equação (2) para obter os valores de vazão em [kg/s]:

$$m_{bio} = \frac{m_{biogás} \cdot \gamma_{biogás}}{31104000\ (^{s}/_{ano})} \quad (2)$$

Sendo:

m_{bio} = vazão mássica de biogás [kg/s]

$m_{biogás}$ = volume de biogás gerado [m^3/ano]

$\gamma_{biogás}$ = massa específica do biogás [= 1,0268 kg/Nm^3]

Com a equação (3), pode-se obter a potência elétrica necessária para as estações de tratamento de esgotos nos municípios:

$$Pot_{nec} = \frac{E_{nec}}{t} \quad (3)$$

Em que:

Pot_{nec} = potência média necessária para a estação de tratamento de esgotos [kW]

E_{nec} = energia elétrica necessária para a estação de tratamento de esgotos [kWh/ano]

t = 8640 [horas/ano]

Com as equações (1), (2) e (3), pode-se obter a Tabela 3 com as vazões mássicas e potências necessárias para as estações de tratamento de esgotos dos municípios analisados.

Tabela 3 - Vazões de biogás e potências necessárias para as estações de tratamentos de esgotos dos municípios estudados

Municípios	Vazão de biogás [kg/s]	Potência necessária [kW]
Campinas	0,252	3060,188
Guaratinguetá	0,008	106,528
Roseira	0,002	15,425

A energia produzida nas estações de tratamento de esgotos podem ser empregadas para atender às necessidades energéticas das próprias ETEs, com base na resolução ANEEL 482/2012 (BRASIL, 2012), podendo ser classificadas como unidades de microgeração ou minigeração distribuída, conforme a capacidade de geração de energia elétrica.

4.2. EQUIPAMENTOS

Para a modelagem foram utilizadas seis microturbinas Capstone e três motores GE Jenbacher muito encontrados na literatura para conversão de biogás de esgoto em energia elétrica.

Na Tabela 4, apresentam-se os dados encontrados para cada uma das microturbinas Capstone, conforme catálogo fornecido pelo fabricante.

Tabela 4 - Dados das microturbinas Capstone estudadas.

Microturbina	Potência gerada [kW]	Vazão de gases de exaustão [kg/s]	Temperatura de exaustão [°C]	*Heat Rate* [MJ/kWh]
C30 HP	30	0,31	275	13,8
C65 HP	65	0,49	309	12,4
C200 HP	200	1,30	280	10,9
C600 HP	600	4,00	280	10,9
C800 HP	800	5,30	280	10,9
C1000 HP	1000	6,70	280	10,9

Fonte: Capstone (2015)

Com os dados obtidos do fabricante e a equação (4) referente a cálculo de *Heat Rate*, pode-se obter a vazão necessária de combustível que atenda o equipamento.

$$mc = \frac{Wliq.HR}{3600.PCI} \quad (4)$$

Sendo:

mc = vazão de combustível [kg/s]

$Wliq$ = potência líquida gerada [kW]

HR = *heat rate* [MJ/kWh]

PCI = poder calorífico inferior do combustível [MJ/kg], para o biogás é 26,1 MJ/kg, segundo Costa (2006)

Na Tabela 5, apresentam-se os dados encontrados para cada um dos motores GE Jenbacher, 1800 rpm, 60 Hz, <500 mg/m^3 de NOx, conforme catálogo fornecido pelo fabricante.

Tabela 5 - Dados dos motores GE Jenbacher estudados.

Motores	Potência elétrica [kW]	Potência térmica [kW]	Rendimento total [%]	Vazão de gases de exaustão [kg/s]	Temperatura de exaustão a plena carga [°C]
J208	335	402	80,6	0,520	500
J320	1059	1321	87,6	1,568	450
J420	1426	1572	84,7	2,095	427

Fonte: General Eletric (2015)

Com os dados obtidos do fabricante e a equação (5) referente a motores em cogeração, pode-se obter a vazão necessária de combustível que atenda o equipamento.

$$mc = \frac{We+Wt}{\eta.PCI} \quad (5)$$

Sendo:

mc = vazão de combustível [kg/s]

We = potência elétrica gerada [MW]

Wt = potência térmica gerada [MW]

η = rendimento total de cogeração

PCI = poder calorífico inferior do combustível [MJ/kg], para o biogás é 26,1 MJ/kg, segundo Costa (2006).

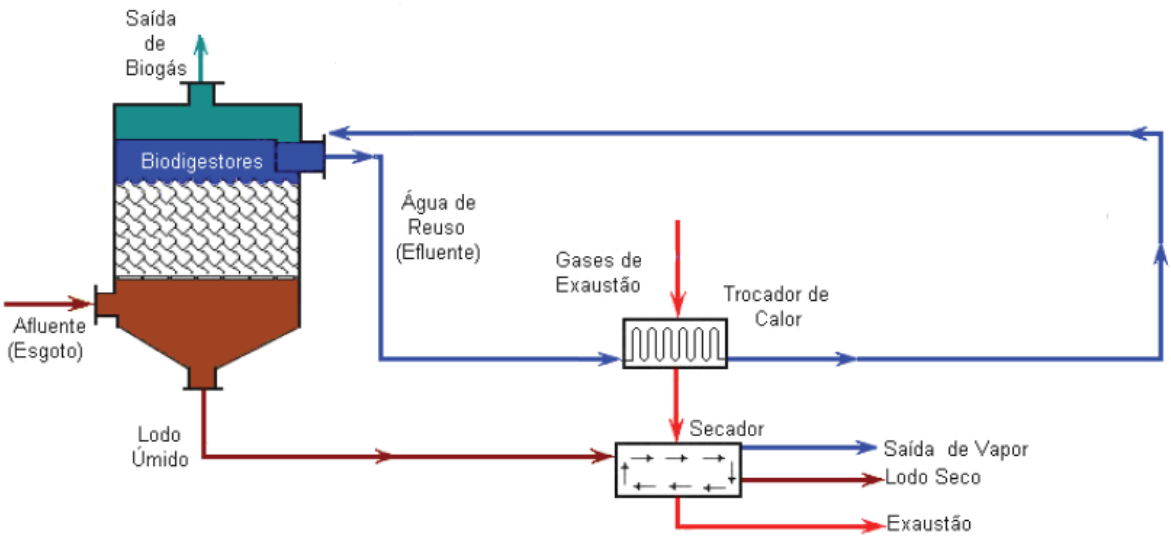
Com as equações (4) e (5) e utilizando os dados fornecidos pelos fabricantes para os equipamentos, pode-se obter a vazão de combustível necessária para cada um dos equipamentos para o fornecimento de potência nominal, conforme apresentado na Tabela 6.

Tabela 6 - Vazões de combustível necessárias.

Equipamento	Vazão de combustível necessária [kg/s]
C30 HP	0,004
C65 HP	0,009
C200 HP	0,023
C600 HP	0,070
C800 HP	0,093
C1000 HP	0,116
J208	0,035
J320	0,103
J420	0,135

Neste trabalho é analisada a possibilidade de aproveitamento energético do biogás em um sistema de cogeração gerando, além de energia elétrica com as tecnologias anteriormente mencionadas (microturbinas a gás Capstone e motores de combustão interna GE Jenbacher), energia térmica utilizando um trocador de calor para aproveitamento dos gases de exaustão da microturbina e do motor, conforme apresentado na Figura 8.

Figura 8 – Aproveitamento dos gases de exaustão



Fonte: Autora

Os gases de exaustão ao saírem da microturbina ou motor passam por um trocador de calor e, considerando que não ocorre mudança de fase, os gases de exaustão sofrem resfriamento até 130°C para entrada no secador, conforme especificação do fabricante do secador, e a água que passa pelo trocador de calor sofre aquecimento de 25°C (temperatura ambiente) para 35°C, sendo então encaminhada para os biodigestores, conforme indica Kothari et al. (2014) como sendo o ideal para a produção de biogás, ou seja, a água aquecida no trocador de calor auxilia a manter a temperatura dos biodigestores no valor ideal para maior produção de biogás, com isso tem-se o aproveitamento dos gases de exaustão para geração de energia térmica para uso no secador de lodo e uso nos biodigestores. Para o cálculo da vazão de água necessária nos biodigestores, tem-se equação (6).

$$mabiod = \frac{mg.cpg.(Tgases - Tsec)}{cpa.(Tabiod - Ta)} \quad (6)$$

Sendo:

$mabiod$ = vazão mássica de água para aquecimento dos biodigestores [kg/s]

mg = vazão mássica dos gases, conforme catálogo da Capstone e da GE Jenbacher [kg/s]

cpg = calor específico dos gases de exaustão, valor igual a 1,15 [kJ/kg.K]

$Tgases$ = temperatura de saída dos gases, conforme catálogo da Capstone e da GE Jenbacher [°C]

$Tsec$ = temperatura de operação do secador de lodo, sendo igual a 130 [^{o}C], conforme especificação do fabricante, considerando-se o secador de lodo Andritz 3Sys AG

cpa = calor específico da água, igual a 4,184 [kJ/kg.K], conforme tabela termodinâmica

$Tabiod$ = temperatura de operação dos biodigestores, igual a 35 [^{o}C], valor este de referência para operação dos biodigestores, conforme França Junior (2008)

Ta = temperatura ambiente da água, igual a 25 [^{o}C]

A Tabela 7 apresenta as vazões mássicas de água que podem ser obtidas para os biodigestores para cada um dos equipamentos analisados.

As limitações impostas aos equipamentos são em relação à vazão mássica de combustível utilizada em cada equipamento, sendo esta limitada pela vazão mássica de biogás disponível na estação de tratamento de esgotos.

Tabela 7 - Vazão mássica de água para os biodigestores dependendo do equipamento

Equipamento	T_{gases} (^{o}C)	m_g (kg/s)	m_{abiod} (kg/s)
C30 HP	275	0,31	1,23
C65 HP	309	0,49	2,41
C200 HP	280	1,30	5,36
C600 HP	280	4,00	16,49
C800 HP	280	5,30	21,85
C1000 HP	280	6,70	27,62
J208	500	0,52	5,29
J320	450	1,57	13,79
J420	427	2,09	17,10

4.3. CUSTOS

O custo relativo ao combustível é analisado como o custo operacional da produção do biogás, conforme equação (7).

$$C_{comb} = C_{oper}.m_{esgoto} \quad (7)$$

Sendo:

C_{comb} = custo do combustível [US$/ano]

C_{oper} = custo operacional de produção do biogás [US$/m^3]

m_{esgoto} = volume de esgoto tratado [m^3/ano]

Segundo França Junior (2008), os custos operacionais para produção de biogás numa planta RALF/UASB de médio porte situam-se entre 0,03 US$/m^3 e 0,05 US$/m^3, tendo sido considerado aqui o valor médio de 0,04 US$/m^3, todos estes valores referentes à vazão de esgoto.

Segundo o SNIS (2013), os valores de taxa média de esgoto para os municípios analisados são de 3,24 R$/m^3 para Campinas, 1,39 R$/m^3 para Guaratinguetá e 1,49 R$/m^3 para Roseira, valores referentes à vazão de esgoto. A cotação média anual do dólar para o ano de 2013 foi de 2,157 R$/US$. Porém esses valores não são utilizados nos cálculos pelo fato de que o tratamento de esgoto ocorre independentemente da produção do biogás.

Os custos relativos às microturbinas Capstone foram obtidos diretamente do fabricante, sendo informados valores aproximados e sem a contabilidade de tributos. Os custos obtidos são: custo de investimento, custo de manutenção por nove anos conforme contrato firmado com o fabricante na compra e custo do sistema de purificação adequado do biogás para utilização no equipamento sendo de 15% do custo de investimento. O custo total de cada uma das microturbinas é, portanto, a soma do custo de investimento, de manutenção e de purificação do biogás relativo. A Tabela 8 apresenta os custos das microturbinas Capstone utilizadas neste trabalho.

Tabela 8 - Custos das microturbinas Capstone

Equipamento	Custo de investimento [US$]	Custo de manutenção [US$]	Custo de purificação [US$]
C30 HP	57.900	37.000	8.685
C65 HP	94.400	68.512	14.160
C200 HP	301.600	210.739	45.240
C600 HP	808.800	632.218	121.320
C800 HP	1.018.100	842.957	152.715
C1000 HP	1.230.400	1.053.000	184.560

Fonte: Vescovo (2015)

Não sendo possível a obtenção dos custos relativos aos motores GE Jenbacher diretamente com o fabricante, as análises de custo foram feitas com base nos valores encontrados e estimados na literatura.

Segundo França Junior (2008), o custo do motor GE Jenbacher J320 é de US$ 850.000,00. Os custos dos demais motores podem ser estimados pela equação (8), segundo Bejan et al. (1996).

$$C_{PE,Y} = C_{PE,W}.\left(\frac{X_Y}{X_W}\right)^{\alpha} \quad (8)$$

Sendo:

$C_{PE,Y}$ = custo do motor de combustão interna desconhecido [US$]

$C_{PE,W}$ = custo do motor de combustão interna conhecido [US$]

X_Y = potência elétrica gerada pelo motor de combustão interna com custo desconhecido [kW]

X_W = potência elétrica gerada pelo motor de combustão interna com valor conhecido [kW]

α = expoente, que para os motores de combustão interna com potência entre 7 kW e 10 MW é de 0,81.

A Tabela 9 apresenta os custos relativos aos motores GE Jenbacher calculados com a equação (8) e baseado no custo apresentado por França Junior (2008).

Tabela 9 - Custos relativos aos motores GE Jenbacher estimados

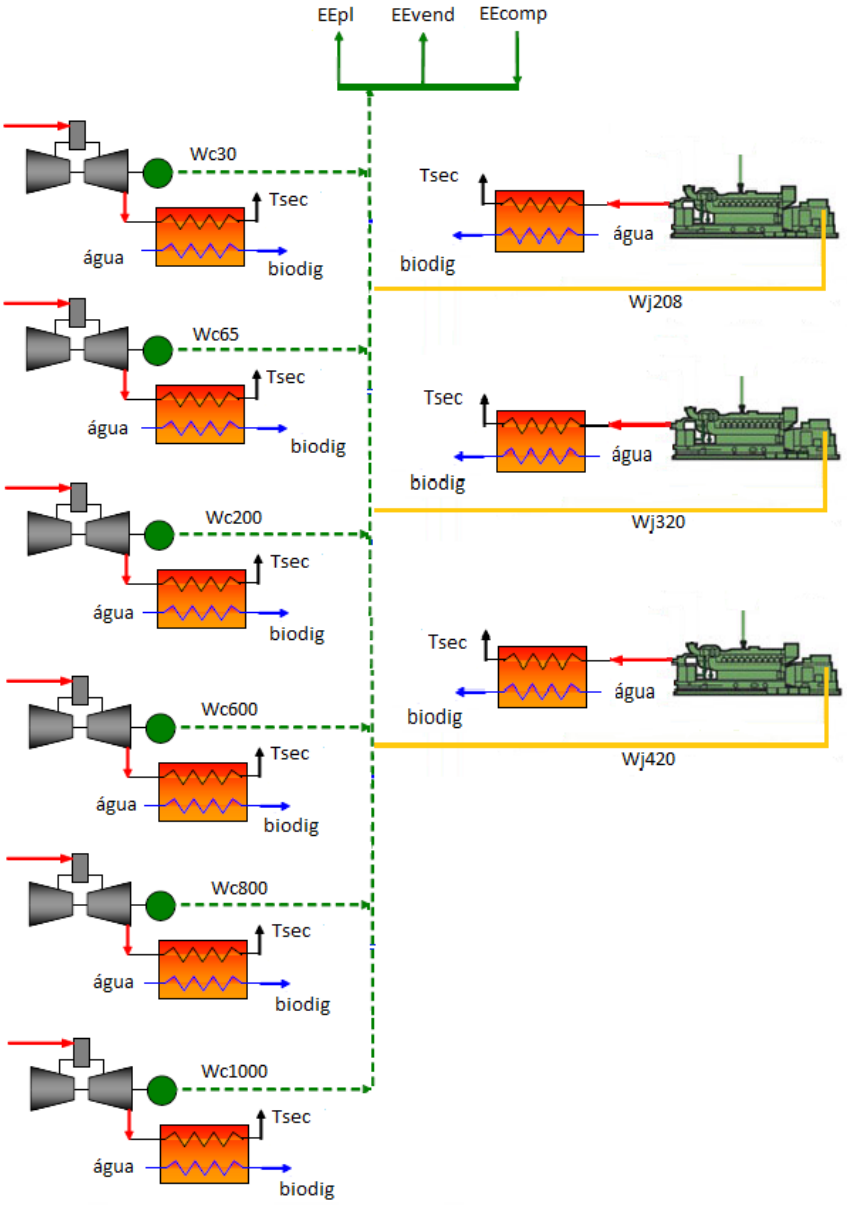
Equipamento	Custo [US$]
J208	334.610,44
J320	850.000,00
J420	1.081.658,12

Os demais equipamentos utilizados na modelagem são um trocador de calor, modelo BEM, de US$ 200.000,00 e um secador de lodo Andritz, modelo 3Sys AG, de US$ 2.140.000,00, porém como esses equipamentos foram os mesmos nas simulações com os motores e com as microturbinas, não foram considerados seus custos na modelagem, somente na análise dos resultados e de viabilidade.

4.4. FORMULAÇÃO

Com os equipamentos mencionados, a superestrutura a ser otimizada é apresentada na Figura 9, composta pelas seis microturbinas e os três motores, que recebem o biogás proveniente dos biodigestores, e pelo trocador de calor que aproveita o calor dos gases de exaustão na geração de vapor para utilização no secador de lodo e na geração de água quente para manter a temperatura ideal de produção de biogás nos biodigestores.

Figura 9 - Superestrutura a ser otimizada



Fonte: Autora

A modelagem dos ciclos térmicos foi feita com a utilização do software LINGO 10, que permite a simulação e obtenção de modelos otimizados. O objetivo é otimizar a superestrutura apresentada na Figura 9 visando o máximo benefício (máxima receita e mínimo custo), usando a função objetivo apresentada na equação (9).

$$Max\ Z = R - D \tag{9}$$

Em que:

$Max\ Z$ = função objetivo de maximizar benefícios [US$/ano]

R = receita [US$/ano]

D = despesa [US$/ano]

Em que a receita é dada pela equação (10) e a despesa pela equação (11)

$$R = EEvend.Pvend.H \tag{10}$$

Sendo:

R = receita [US$/ano]

$EEvend$ = potência elétrica gerada possivelmente vendida à concessionária [MW]

$Pvend$ = preço de venda da energia elétrica [US$/MWh]

H = horas de funcionamento, iguais a 8640 [h/ano]

$$D = Ccomb + Cinvt.FRC + EEcomp.Pcomp.H \tag{11}$$

Sendo:

D = despesa [US$/ano]

$Ccomb$ = custo do combustível [US$/ano]

$Cinvt$ = custo de investimento total dos equipamentos [US$]

$EEcomp$ = potência elétrica possivelmente comprada da concessionária [MW]

$Pcomp$ = preço de compra da energia elétrica [US$/MWh]

H = horas de funcionamento, iguais a 8640 [h/ano]

FRC = fator de amortização de capital [1/ano], em que:

$$FRC = \frac{(1+i)^n * i}{(1+i)^n - 1} \tag{12}$$

i = taxa anual de juros [%], segundo dados do Banco Central do Brasil, BRASIL (2015), para 21/10/2015 a taxa média anual é de 14,15%

n = tempo de amortização [anos], segundo dados da Agência Nacional de Energia Elétrica, BRASIL (2000), para os motores de combustão interna é de 15 anos e para as turbinas a gás de 20 anos, sendo utilizado o valor de 15 anos para ambos.

As restrições da modelagem ficam por conta da vazão de combustível e da potência gerada pelos equipamentos, segundo equações (13), (14), (15), (16) e (17).

$$m_i < m_{biogás} \tag{13}$$

Em que:

m_i = vazão de combustível necessária a cada um dos equipamentos operando com biogás de esgotos

$m_{biogás}$ = vazão de biogás possível de se obter na estação de tratamento de esgotos

$$y_i = se(m_i < m_{biogás}, 1, 0) \tag{14}$$

Em que:

y_i = variável booleana que só será 1 se a vazão necessária pelo equipamento for menor do que a disponibilizada para geração de energia

$$x_i = se(y_i = 1, \frac{m_{biogás}}{m_i}, 0) \tag{15}$$

Em que:

x_i = variável inteira que indica a quantidade de equipamentos possíveis para a configuração, se o equipamento atender à condição de necessitar de menos biogás do que a estação provê

$$E_{prod} = Max(W_i * x_i) \tag{16}$$

Em que:

E_{prod} = potência produzida pela estação de tratamento é aquela obtida pela configuração com maior geração, ou seja, a potência gerada pelo equipamento multiplicada pela quantidade de equipamentos, sendo assim, escolhido um único tipo de equipamento [MW].

$$EEcomp - EEvend + EEprod = EEpl \quad (17)$$

Em que:
$EEpl$ = potência necessária pela planta da estação de tratamento de esgotos [MW]
$EEcomp$ = potência comprada da concessionária [MW]
$EEvend$ = potência vendida para a concessionária [MW]
$EEprod$ = potência produzida pela estação de tratamento de esgotos [MW]

4.5. MODELAGEM

O modelo foi testado no software LINGO (LINDO, 2006) de modo a se obter a melhor configuração de equipamentos que atenda de forma viável termodinâmica e economicamente as necessidades das estações de tratamento de esgotos de cada um dos municípios analisados.

Foram analisados quatro cenários para cada uma das cidades:

4.5.1. Cenário 1. Modelagem atual

Considerando todos os dados referentes aos municípios e aos equipamentos, além de utilizar o preço de compra de energia elétrica como o valor indicado pela ANEEL BRASIL (2015) no ano de 2015 para tarifa média de fornecimento com tributos para o serviço público (água, esgoto e saneamento) de 415,48 R$/MWh, a cotação do dólar de 3,74 R$/US$ no dia 27/11/2015, preço de venda de energia elétrica como 70% do preço de compra de energia elétrica e taxa de juros de 14,15% conforme indicado pelo Banco Central do Brasil BRASIL (2015) como taxa média anual para 2015.

4.5.2. Cenário 2. Análise de sensibilidade ao preço de compra de energia elétrica

Considerando todos os dados referentes aos municípios e aos equipamentos, mantendo o preço de venda de energia elétrica como 70% do preço de compra de energia elétrica e taxa de juros de 14,15% conforme indicado pelo Banco Central do Brasil BRASIL (2015) como taxa

média anual para 2015, porém variando o preço de compra da energia elétrica em 50% a mais e a menos da tarifa média de fornecimento com tributos para o serviço público (água, esgoto e saneamento) encontrada para o ano de 2015.

4.5.3. Cenário 3. Análise de sensibilidade ao preço de venda de energia elétrica

Considerando todos os dados referentes aos municípios e aos equipamentos, além de utilizar o preço de compra de energia elétrica como o valor indicado pela ANEEL BRASIL (2015) no ano de 2015 para tarifa média de fornecimento com tributos para o serviço público (água, esgoto e saneamento) de 415,48 R$/MWh, a cotação do dólar de 3,74 R$/US$ no dia 27/11/2015 e taxa de juros de 14,15% conforme indicado pelo Banco Central do Brasil BRASIL (2015) como taxa média anual para 2015, porém variando o preço de venda de energia elétrica entre 40 e 100% do preço de compra de energia elétrica.

4.5.4. Cenário 4. Análise de sensibilidade à taxa anual de juros

Considerando todos os dados referentes aos municípios e aos equipamentos, além de utilizar o preço de compra de energia elétrica como o valor indicado pela ANEEL BRASIL (2015) no ano de 2015 para tarifa média de fornecimento com tributos para o serviço público (água, esgoto e saneamento) de 415,48 R$/MWh, a cotação do dólar de 3,74 R$/US$ no dia 27/11/2015 e preço de venda de energia elétrica como 70% do preço de compra de energia elétrica, porém com a taxa de juros variando entre 8 e 18%.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Cenário 1. Modelagem atual

Na simulação realizada com as condições do cenário 1 para os municípios analisados foram obtidos os resultados referentes a receita [US$/ano], despesa [US$/ano], equipamentos escolhidos, potência gerada [kW] e vazão mássica de água para os biodigestores [kg/s] conforme apresentado na Tabela 10.

Tabela 10 - Resultados para modelagem atual

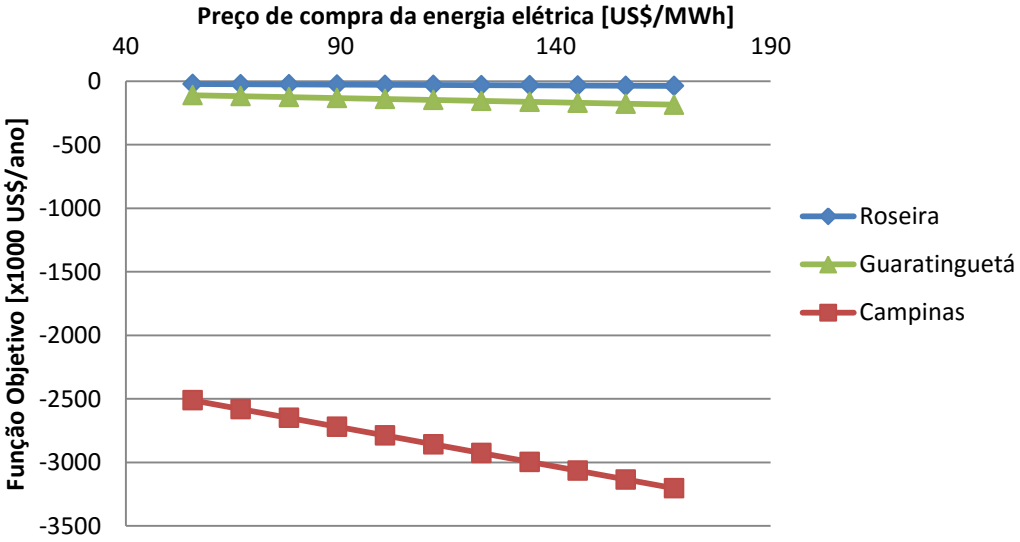
Município	Campinas	Guaratinguetá	Roseira
Receita [US$/ano]	0	0	-
Despesa [US$/ano]	2.854.432	146.849,50	29.262,97
Quantidade de equipamentos	7	1	-
Equipamentos	Motores J208	Microturbina C30	-
Potência necessária [kW]	3060,19	106,53	15,42
Potência gerada [kW]	2345	30	-
Vazão de água [kg/s]	37,03	1,23	-

Com os resultados obtidos no cenário 1, pode-se observar que tanto em Guaratinguetá quanto em Campinas não houve excedente e consequente venda de energia elétrica, sendo que a energia produzida foi utilizada somente de modo a diminuir a necessidade de compra de energia da concessionária. Observa-se também que não houve resultados relativos a equipamentos para a cidade de Roseira, uma vez que o maior limitante da modelagem era a vazão mássica de combustível, devendo esta ser menor do que a vazão mássica de biogás disponibilizada pela estação de tratamento de esgotos, o que não ocorre no caso de Roseira, que apresenta menos da metade (0,0022 kg/s) da vazão necessária ao equipamento que requer menos biogás (0,0044 kg/s na microturbina C30). No entanto, existe a indicação da despesa referente ao custo da produção do biogás e da compra de energia elétrica da concessionária para o funcionamento da estação de tratamento de esgotos. Para Guaratinguetá é interessante observar que o equipamento escolhido foi uma microturbina Capstone C30 e que este equipamento é o único capaz de operar com a quantidade de biogás a ser disponibilizada pela estação de tratamento de esgotos, por ser o equipamento que requer menor vazão de combustível dentre os estudados.

5.2. Cenário 2. Análise de sensibilidade ao preço de compra de energia elétrica

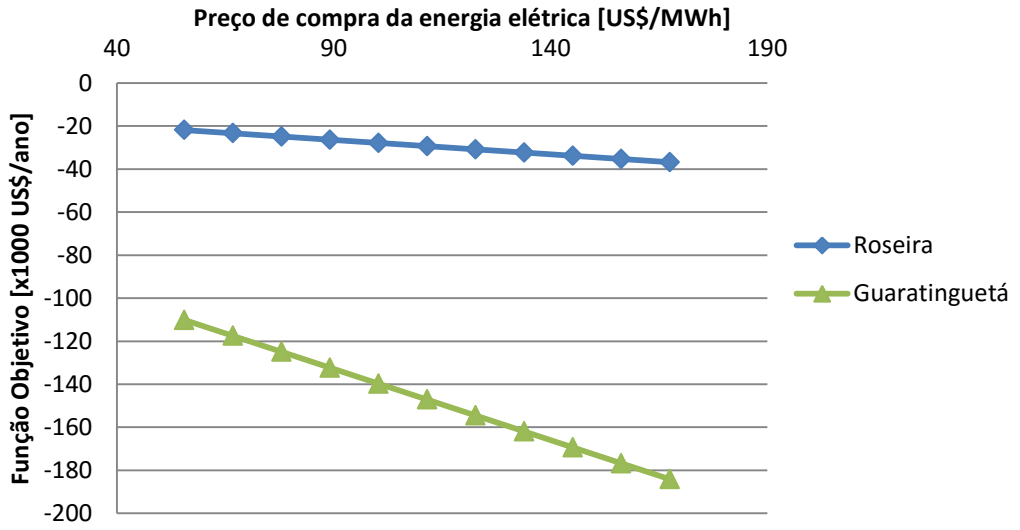
Na simulação realizada com as condições do cenário 2 para os municípios analisados foram obtidos os resultados referentes a função objetivo [US$/ano] variando o preço de compra de energia elétrica entre 55,54 US$/MWh e 167,54 US$/MWh e mantendo constantes os demais fatores da modelagem, conforme apresentado nas Figuras 10 e 11.

Figura 10 - Resultados para a análise de sensibilidade ao preço de compra de energia elétrica



Fonte: Autora

Figura 11- Resultados para a análise de sensibilidade ao preço de compra de energia elétrica (ampliado para Roseira e Guaratinguetá)



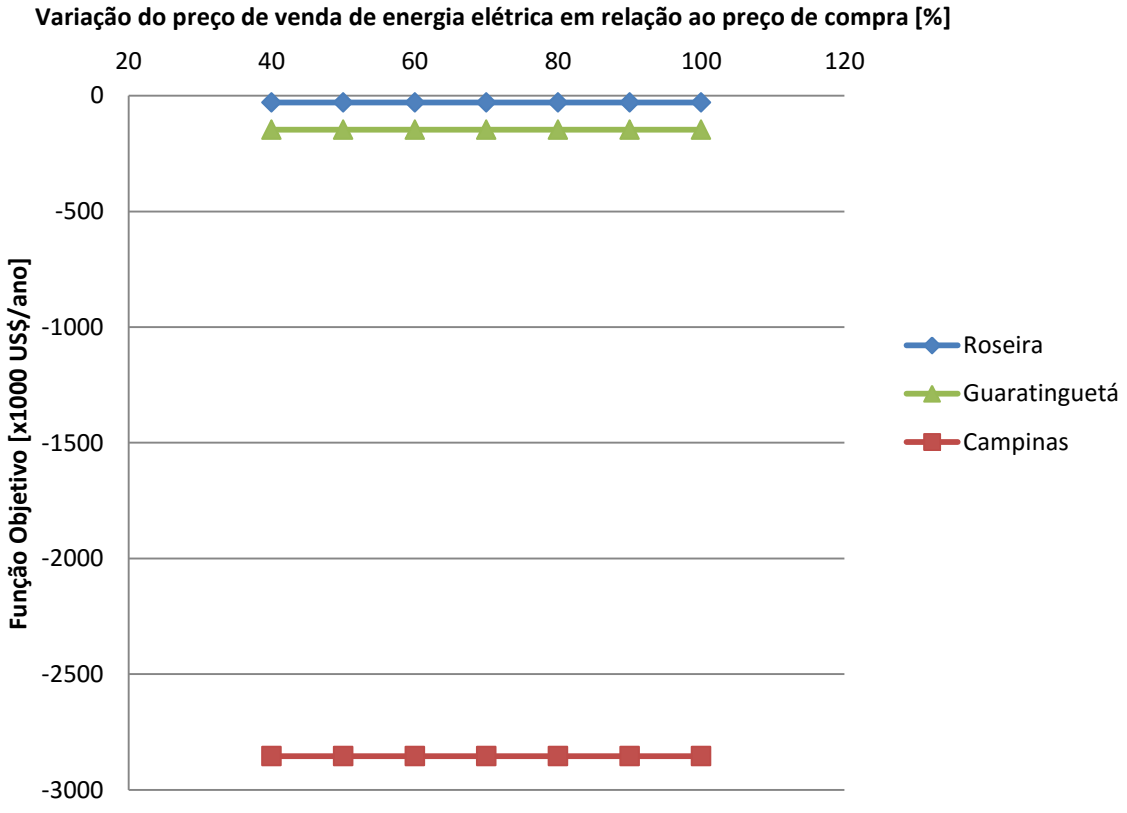
Fonte: Autora

Pode-se observar que para todos os municípios o aumento do preço de compra da energia elétrica resultou em um decréscimo na função objetivo, ou seja, no aumento das despesas da estação de tratamento de esgotos, isso porque a despesa está diretamente relacionada ao preço de compra de energia elétrica e como não houve geração de energia suficiente para ser vendida não houve uma compensação pela venda de energia elétrica. Observa-se que como Campinas possui uma estação de tratamento de esgotos com uma capacidade maior, suas despesas, consequentemente, são maiores e crescem em uma proporção maior do que as de Guaratinguetá e Roseira que possuem estações menores e apresentam um crescimento nas despesas pequeno quando comparado com o de Campinas.

5.3. Cenário 3. Análise de sensibilidade ao preço de venda de energia elétrica

Na simulação realizada com as condições do cenário 3 para os municípios analisados foram obtidos os resultados referentes a função objetivo [US$/ano] variando o preço de venda de energia elétrica entre 40% e 100% do preço de compra de energia elétrica e mantendo constantes os demais fatores da modelagem, conforme apresentado na Figura 12.

Figura 12 - Resultados para a análise de sensibilidade ao preço de venda de energia elétrica



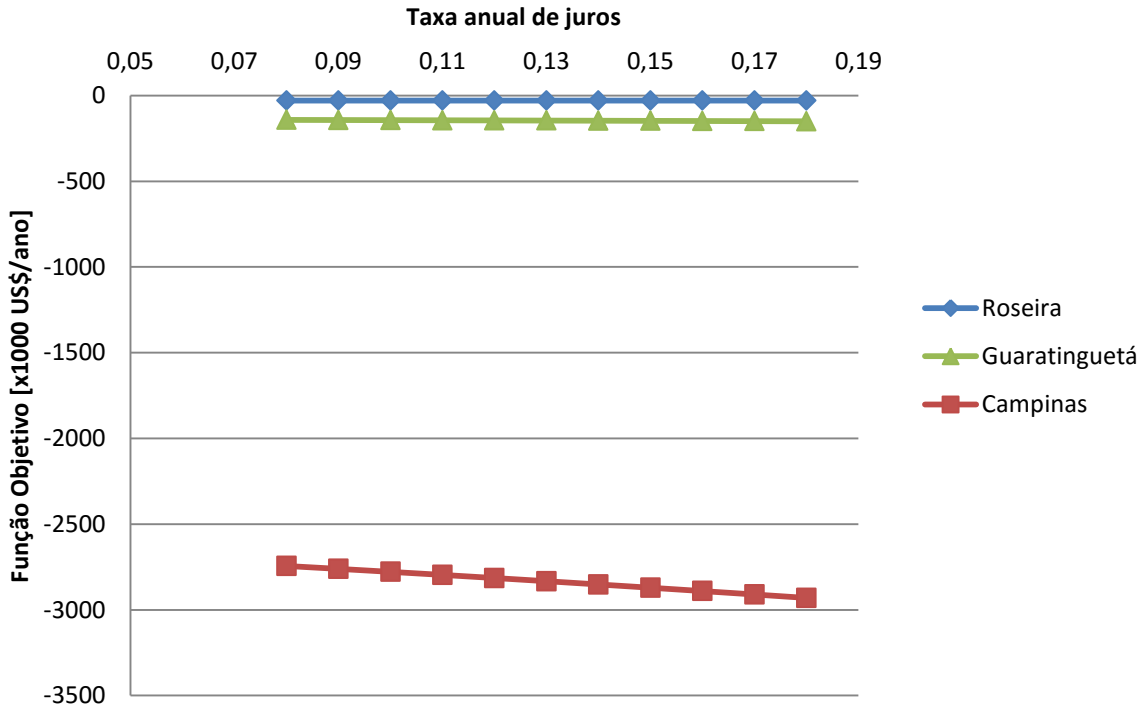
Fonte: Autora

Como já era esperada, a variação do preço de venda de energia elétrica não causou impacto no valor da função objetivo, uma vez que, como já dito na análise do preço de compra de energia elétrica (cenário 2), nenhum dos municípios estudados apresenta geração de energia elétrica excedente, ou seja, suficiente para suprir as estações de tratamento e vender o excedente, portanto a função objetivo independente do preço de venda de energia elétrica é uma constante em qualquer dos municípios estudados.

5.4. Cenário 4. Análise de sensibilidade à taxa anual de juros

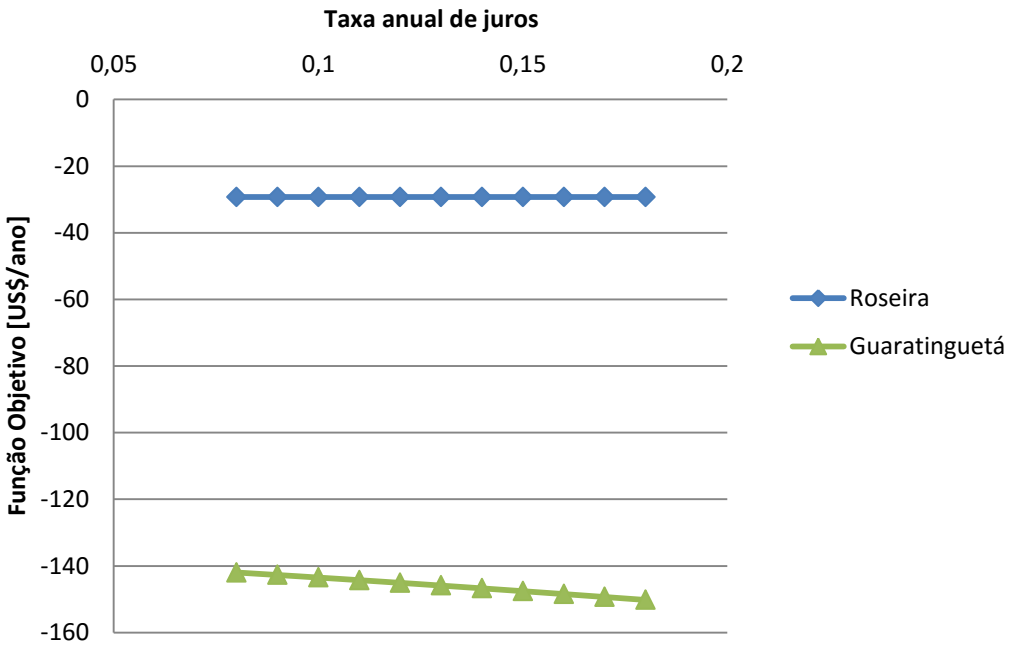
Na simulação realizada com as condições do cenário 4 para os municípios analisados foram obtidos os resultados referentes a função objetivo [US$/ano] variando a taxa anual de juros entre 8 e 18% e mantendo constantes os demais fatores da modelagem, conforme apresentado nas Figuras 13 e 14.

Figura 13 - Resultados para a análise de sensibilidade à taxa anual de juros



Fonte: Autora

Figura 14- Resultados para a análise de sensibilidade à taxa anual de juros (ampliado para Roseira e Guaratinguetá)



Fonte: Autora

Observam-se três comportamentos diferentes para os municípios estudados quando se varia a taxa anual de juros, sendo que em Campinas ocorre um aumento considerável nas despesas e, consequentemente, um decréscimo considerável na função objetivo, em Guaratinguetá ocorre um aumento sutil nas despesas e, consequentemente, um decréscimo sutil na função objetivo, e em Roseira não ocorre alteração nenhuma, pois independentemente da taxa anual de juros a função objetivo se mantém constante devido ao fato de nenhum equipamento ser utilizado pela modelagem, conforme descrito no cenário 1.

5.5. Alternativa utilizando comercialização de créditos de carbono

Uma alternativa possível para viabilizar o uso de cogeração nas estações de tratamento de esgoto utilizando biogás como combustível é a comercialização de créditos de carbono. Os créditos de carbono são calculados com base no total de energia gerada na planta, sendo então comercializados no mercado e gerando receita para a estação de tratamento.

Segundo França Junior (2008), é possível contabilizar os créditos de carbono conforme equações (18), (19) e (20).

$$E_{tg} = E_p . H \tag{18}$$

Em que:

E_{tg} = energia total gerada [kWh/ano]

E_p = potência suprida [kW]

H = horas de funcionamento, iguais a 8640 [h/ano]

$$T_{CO_2} = E_{tg} . FTI \tag{19}$$

Em que:

T_{CO_2} = total de CO_2 equivalente evitado [tCO_2 equivalente/ano]

E_{tg} = energia total gerada [kWh/ano]

FTI = fator de intensidade de carbono equivalente [tCO_2 equivalente/kWh], segundo dados da *Greenhouse Gas Protocol*, o fator de intensidade de carbono equivalente em 2012 é de 0,0653 [tCO_2 equivalente/MWh]

$$TOT_{CEE} = T_{CO_2} . P_{CO} \tag{20}$$

Em que:

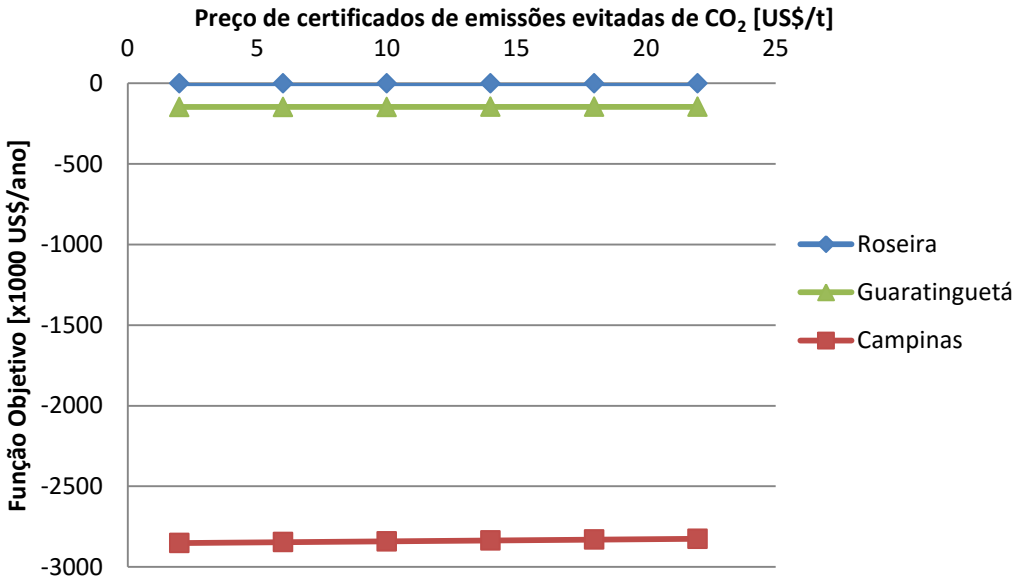
TOT_{CEE} = total de US$ em certificados [US$/ano]

T_{CO_2} = total de CO_2 equivalente evitado [tCO_2 equivalente/ano]

P_{CO} = valor de certificados de emissões evitadas de CO_2 [US$/t]

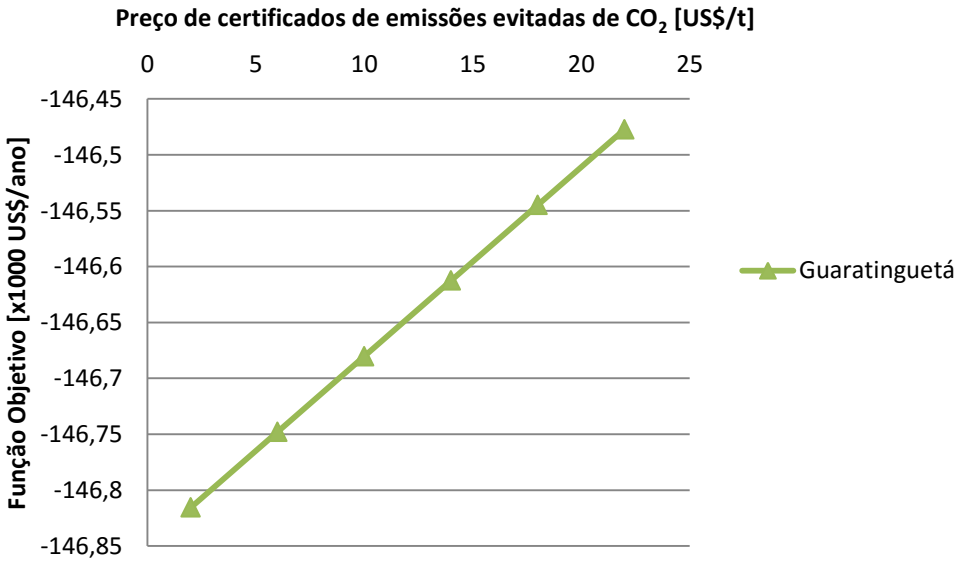
Fazendo uma análise de sensibilidade com o preço de certificados de emissões evitadas de CO_2 variando entre 2 US$/t e 22 US$/t, obtêm-se os valores de função objetivo [US$/ano] apresentadas nas Figuras 15, 16 e 17.

Figura 15 - Análise de sensibilidade ao preço de certificados de emissões evitadas de CO_2



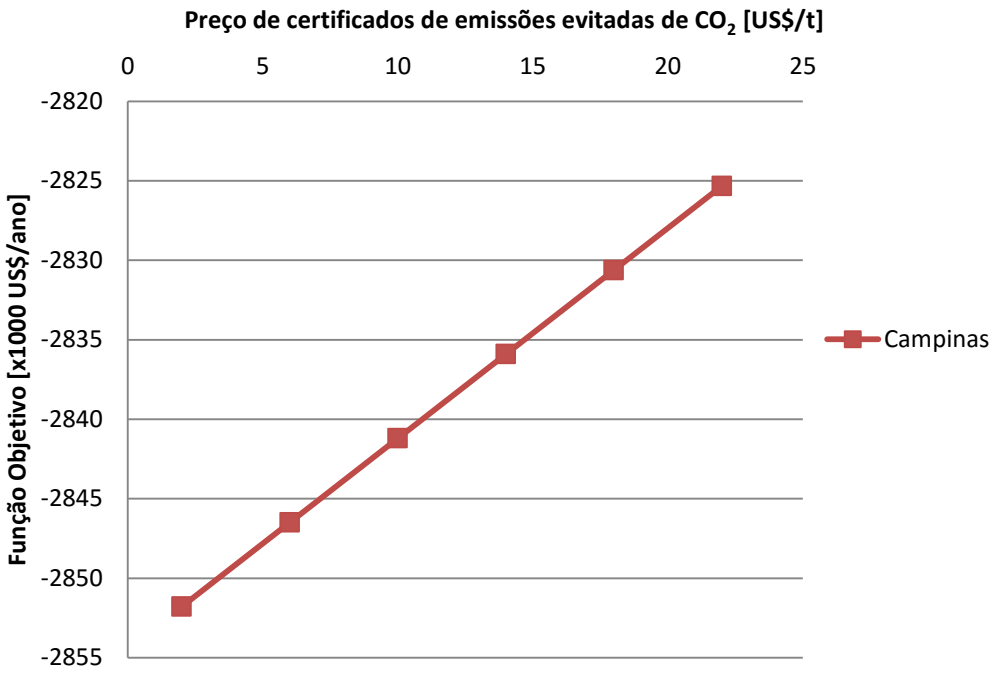
Fonte: Autora

Figura 16 - Análise de sensibilidade ao preço de certificados de emissões evitadas de CO_2 (ampliado para Guaratinguetá)



Fonte: Autora

Figura 17 - Análise de sensibilidade ao preço de certificados de emissões evitadas de CO_2 (ampliado para Campinas)



Fonte: Autora

Pode-se observar um aumento da função objetivo, uma vez que existe agora a receita gerada pela comercialização dos créditos de carbono em Campinas e Guaratinguetá, pois houve abatimento do custo referente à energia elétrica. No entanto, como Roseira não gera energia elétrica na estação de tratamento, conforme apresentado no cenário 1, também não existe a comercialização de créditos de carbono e consequente aumento da receita e da função objetivo para este município. Embora a comercialização de créditos de carbono tenha aumentado a receita, ainda não supera a despesa em Guaratinguetá e Campinas.

5.6. Alternativa utilizando cargas parciais

Uma alternativa para que as baixas vazões mássicas de biogás de esgoto possam ser utilizadas nos equipamentos é a análise das microturbinas e motores operando em cargas parciais, pois uma vez que a potência gerada é menor, necessita-se de menos combustível, podendo viabilizar o uso de alguns desses equipamentos nas cidades.

Na Tabela 11, apresentam-se os dados encontrados para cada uma das microturbinas Capstone operando em cargas parciais, conforme disponibilizado pelo fabricante.

Tabela 11 - Dados das microturbinas Capstone em cargas parciais

Microturbina	Carga	Potência gerada [kW]	*Heat Rate* [MJ/kWh]
C30 HP	50%	15	15,5
C30 HP	60%	18	14,8
C30 HP	70%	21	14,3
C30 HP	80%	24	14,0
C30 HP	90%	27	13,9
C65 HP	50%	32,5	14,6
C65 HP	60%	39	13,8
C65 HP	70%	45,5	13,2
C65 HP	80%	52	12,9
C65 HP	90%	58,5	12,6
C200 HP	50%	100	11,7
C200 HP	60%	120	11,3
C200 HP	70%	140	11,1
C200 HP	80%	160	11,0
C200 HP	90%	180	10,9
C600 HP	50%	300	11,7
C600 HP	60%	360	11,3
C600 HP	70%	420	11,1
C600 HP	80%	480	11,0
C600 HP	90%	540	10,9
C800 HP	50%	400	11,7
C800 HP	60%	480	11,3

Tabela 11 - Dados das microturbinas Capstone em cargas parciais (continuação)

Microturbina	Carga	Potência gerada [kW]	*Heat Rate* [MJ/kWh]
C800 HP	70%	560	11,1
C800 HP	80%	640	11,0
C800 HP	90%	720	10,9
C1000 HP	50%	500	11,7
C1000 HP	60%	600	11,3
C1000 HP	70%	700	11,1
C1000 HP	80%	800	11,0
C1000 HP	90%	900	10,9

Fonte: Vescovo (2016)

Com os dados obtidos do fabricante e a equação (4) referente a cálculo de *Heat Rate*, pode-se obter a vazão necessária de combustível que atenda o equipamento.

$$mc = \frac{Wliq.HR}{3600.PCI} \tag{4}$$

Sendo:

mc = vazão de combustível [kg/s]

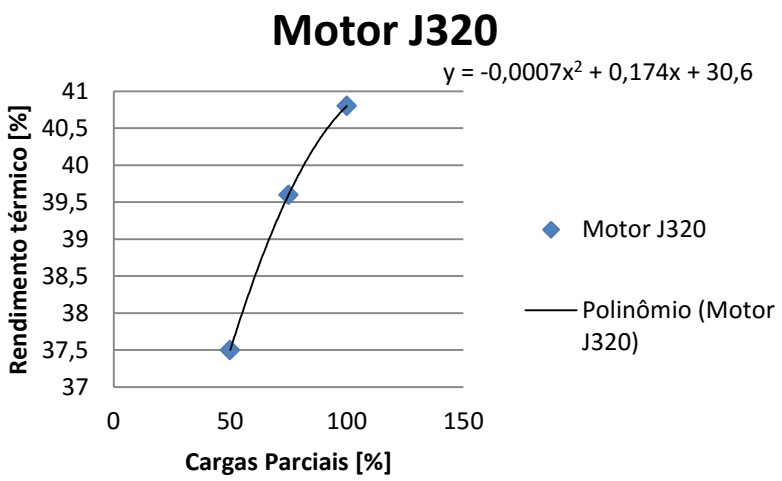
$Wliq$ = potência líquida gerada [kW]

HR = *heat rate* [MJ/kWh]

PCI = poder calorífico inferior do combustível [MJ/kg], para o biogás é 26,1 MJ/kg, segundo Costa (2006)

Para os motores GE Jenbacher não foi possível obter as cargas parciais diretamente do fabricante, porém foi encontrado em catálogo do motor J320 a operação em cargas parciais de 50, 75 e 100%; com estes três pontos foi possível foi possível traçar uma curva de regressão quadrática que melhor representasse a variação nessa faixa, conforme Figura 18.

Figura 18 – Cargas parciais do motor J320



Fonte: Autora.

Considerando-se que o motor J320 é um intermediário entre os motores aqui estudados, que todos operam com o mesmo combustível e são do mesmo fabricante, será adotado neste trabalho que todos os motores operam em cargas parciais segundo a equação da curva obtida para o J320, equação (21), podendo-se assim obter as cargas parciais para os outros motores.

$$\eta_{cp} = -0{,}0007.cp^2 + 0{,}174.cp + 30{,}6 \quad (21)$$

Sendo:

η_{cp}= rendimento térmico em carga parcial [%]

cp = carga parcial [%]

Na Tabela 12 têm-se as cargas parciais com as respectivas potências e eficiências para cada um dos motores GE Jenbacher estudados.

Tabela 12 - Motores GE Jenbacher em cargas parciais

Motor	Carga	Potência gerada [kW]	Rendimento térmico [%]
J208	50%	167,5	37,55
J208	60%	201,0	38,52
J208	70%	234,5	39,35
J208	80%	268,0	40,04

Tabela 12 - Motores GE Jenbacher em cargas parciais (continuação)

Motor	Carga	Potência gerada [kW]	Rendimento térmico [%]
J208	90%	301,5	40,59
J320	50%	529,5	37,55
J320	60%	635,4	38,52
J320	70%	741,3	39,35
J320	80%	847,2	40,04
J320	90%	953,1	40,59
J420	50%	713	37,55
J420	60%	855,6	38,52
J420	70%	998,2	39,35
J420	80%	1140,8	40,04
J420	90%	1283,4	40,59

Com os dados obtidos pela equação (21) e utilizando-se a equação (22) pode-se obter a vazão necessária de combustível que atenda o equipamento.

$$mc = \frac{We}{\eta_{cp}.PCI} \tag{22}$$

Sendo:

mc = vazão de combustível [kg/s]

We = potência elétrica gerada [MW]

η_{cp}= rendimento térmico em carga parcial [%]

PCI = poder calorífico inferior do combustível [MJ/kg], para o biogás é 26,1 MJ/kg, segundo Costa (2006).

A Tabela 13 apresenta os valores de vazão de combustível para todos os equipamentos operando em cargas parciais.

Tabela 13 – Vazões de combustível para os equipamentos operando em cargas parciais

Equipamentos	Vazão a 50% [kg/s]	Vazão a 60% [kg/s]	Vazão a 70% [kg/s]	Vazão a 80% [kg/s]	Vazão a 90% [kg/s]
C30 HP	0,0025	0,0028	0,0032	0,0036	0,0040
C65 HP	0,0051	0,0057	0,0064	0,0071	0,0078
C200 HP	0,0125	0,0144	0,0165	0,0187	0,0209
C600 HP	0,0374	0,0433	0,0496	0,0562	0,0626
C800 HP	0,0498	0,0577	0,0662	0,0749	0,0835
C1000 HP	0,0623	0,0722	0,0827	0,0937	0,1044
J208	0,0171	0,0200	0,0228	0,0256	0,0285
J320	0,0540	0,0632	0,0722	0,0811	0,0900
J420	0,0728	0,0851	0,0972	0,1092	0,1211

Com os valores calculados de vazão de combustível necessária e com os dados de potência gerada, pode-se realizar a simulação para cargas parciais em todos os equipamentos nas cidades estudadas.

Na Tabela 14 têm-se os resultados obtidos para a despesa [US$/ano] para cada uma das cidades estudadas quando os equipamentos operam com cargas parciais de 50, 60, 70, 80 e 90%.

Tabela 14 – Despesas nas cidades com os equipamentos operando em cargas parciais

Carga parcial	50%	60%	70%	80%	90%
Campinas	3.238.565,00	3.064.505,00	3.019.060,00	2.699.799,00	2.612.195,00
Guaratinguetá	166.428,10	150.263,00	144.024,20	137.785,40	140.801,80
Roseira	29.262,97	29.262,97	29.262,97	29.262,97	29.262,97

Na Tabela 15 têm-se os resultados obtidos para os equipamentos indicados para cada uma das cidades estudadas quando operando em cargas parciais de 50, 60, 70, 80 e 90%.

Tabela 15 – Equipamentos indicados quando operando em cargas parciais (número de equipamentos e modelo)

Carga parcial	50%	60%	70%	80%	90%
Campinas	14 x J208	12 x J208	10 x J208	3 x J320	2 x J420
Guaratinguetá	3 x C30	1 x C65	1 x C65	1 x C65	2 x C30
Roseira	-	-	-	-	-

Com os resultados obtidos na modelagem com cargas parciais pode-se observar que Roseira mantém a mesma despesa independente da carga do equipamento; isso ocorre porque nenhum dos equipamentos, ainda que com carga de 50%, consegue superar a limitação de vazão mássica de combustível, ou seja, Roseira não produz biogás suficiente para suprir o equipamento que necessita de menor vazão de biogás operando a menor carga (microturbina C30 operando com carga de 50%).

Os resultados mostram que a despesa de Guaratinguetá diminui até atingir um mínimo com carga de 80% e depois tornam a crescer; os equipamentos indicados mudaram dependendo da carga em que operavam, porém o melhor resultado foi o obtido com carga de 80% em uma microturbina Capstone C65.

Nos resultados de Campinas, pode-se observar uma grande variação na quantidade e em quais os equipamentos mais indicados, sendo que foram indicados todos os motores Jenbacher e em quantidades diferentes, dependendo da carga em que os equipamentos estavam operando no momento. A melhor situação para Campinas é operando com carga de 90% em dois motores GE Jenbacher J420, pois é a situação que apresenta a menor despesa.

5.7. Alternativa utilizando biogás gerado em aterros sanitários junto com o biogás de esgoto

Um grande problema também existente nas cidades é relativo à geração de resíduos sólidos urbanos e o seu descarte na natureza. Uma das possibilidades de solução desse problema é a existência de aterros sanitários para deposição dos resíduos em área apropriada. Nesses aterros ocorre a formação de biogás devido à decomposição dos resíduos e este biogás pode ser aproveitado para geração de energia elétrica, portanto, neste trabalho será feita uma análise da combinação do biogás gerado com os esgotos sanitários e o biogás gerado nos aterros sanitários.

No quesito planejamento de cidades é interessante verificar a possibilidade de geração de energia utilizando-se o biogás de aterro e o biogás de esgotos, pois, uma vez demonstrado ser viável, pode-se conceber um planejamento em que efluentes da Estação de Tratamento de Esgotos e o aterro sanitário de uma cidade estejam localizados próximos um do outro de modo a permitir a geração de energia com o biogás produzido em ambas.

Segundo dados fornecidos pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB, 2015), a produção de resíduos sólidos urbanos das cidades aqui estudadas é a apresentada na Tabela 16.

Tabela 16 – Produção de resíduos sólidos urbanos nas cidades estudadas

Cidade	Produção [t/dia]
Campinas	1258,49
Guaratinguetá	102,09
Roseira	6,88

Para o cálculo teórico da produção de metano a partir dos resíduos sólidos urbanos usa-se a equação (23) da metodologia recomendada pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC, 1996).

$$Bio_{gerado} = (\frac{16}{12}.Q_{lixo}.FCM.COD.COD_f.F - R).(1 - OX) \quad (23)$$

Sendo:

Bio_{gerado}= quantidade de metano gerado [t CH_4/ano]

Q_{lixo} = quantidade de resíduos sólidos depositados no aterro [t/ano]

FCM = fator de correção de metano, IPCC indica 0,6 para os locais sem classificação e como no Brasil, não há dados disponíveis sobre a profundidade dos locais de disposição de resíduos, foi utilizado este valor para todos os municípios.

COD = fração de carbono orgânico degradável [t C/t RSU], sugerido pelo IPCC o valor de 0,12 para o Brasil.

COD_f = fração de carbono orgânico degradável assimilado, recomendado pelo IPCC o valor de 0,77

F = fração de CH_4 no gás de aterro, o IPCC recomenda 0,50

$^{16}/_{12}$ = taxa de conversão de carbono em metano

R = quantidade de metano recuperado [kg CH_4/ano] é considerada insignificante

OX = fator de oxidação é considerado zero

Segundo o Coelho et al. (2008), é necessário salientar que, na geração de metano, a partir da disposição de resíduos sólidos, há variação ao longo do tempo conforme se aumenta ou diminui a disposição de matéria orgânica. Sendo assim, a equação (23) se refere ao potencial de metano gerado ao longo de um ano de disposição, não considerando o metano que possa já estar sendo emitido a partir do lixo depositado anteriormente. A quantidade de metano emitida poderá aumentar conforme se aumenta o lixo contido no aterro com o passar do tempo, pois a curva de geração de metano tem comportamento crescente durante o período em que o aterro recebe lixo, a cada nova tonelada de lixo depositada, soma-se um novo potencial de geração de biogás. O ponto máximo da curva ocorre no último ano de disposição do lixo no aterro e a partir daí a curva é regida pela constante de decaimento referente à degradação da matéria orgânica no tempo.

Com a equação (23), considerando-se o ano com 365 dias e que o ano possui 31.104.000 segundos, pode-se calcular a quantidade de metano gerado nas cidades estudadas, considerando-se a existência de um aterro sanitário, e obtém-se o disposto na Tabela 17.

Tabela 17 – Metano gerado em aterro sanitário nas cidades estudadas

Municípios estudados	Resíduos [t/dia]	Resíduos [t/ano]	Metano produzido [t/ano]	Metano produzido [kg/s]
Campinas	1.258,49	459.348,90	16.977,53	0,546
Guaratinguetá	102,09	37.262,85	1.377,23	0,044
Roseira	6,88	2.511,20	92,81	0,003

Segundo Swedish Gas Centre (2012), o poder calorífico inferior do biogás de aterro é 12,3 MJ/kg e utilizando-se as equações (4) e (5) pode-se calcular a vazão mássica de combustível (biogás de aterro) solicitada para atender os equipamentos estudados neste trabalho, conforme Tabela 18.

Tabela 18 – Vazão mássica de biogás de aterro necessária aos equipamentos

Equipamento	Potência elétrica [kW]	*Heat Rate* [MJ/kWh]	Potência térmica [kW]	Rendimento global [%]	Vazão de biogás de aterro [kg/s]
C30	30	13,8			0,009
C65	65	12,4			0,018
C200	200	10,9			0,049
C600	600	10,9			0,148
C800	800	10,9			0,197
C1000	1000	10,9			0,246
J208	335		402	80,6	0,074
J320	1059		1321	87,6	0,221
J420	1426		1572	84,7	0,288

Segundo Silva (2015) os custos orçamentários anuais estimados da operação e manutenção da geração de biogás para geração de energia são de aproximadamente 1,8 centavos de dólar por kWh de saída de eletricidade, podendo-se assim estimar o custo do biogás de aterro pela equação (24).

$$C_{biog_{aterro}} = \frac{P_{biog_{aterro}}.EEprod}{1000}.H \quad (24)$$

Sendo:

C_{biog_aterro}= custo de operação e manutenção [US$/ano]

P_{biog_aterro} = preço do biogás de aterro [US$/kWh]

$EEprod$= potência suprida pela estação de tratamento de esgotos [MW]

H= horas de funcionamento, iguais a 8640 [h/ano]

Com os dados acima é possível realizar uma simulação considerando a vazão de biogás de aterro em conjunto com a vazão de biogás de esgoto e se verificar quais as tecnologias que melhor atendem a cada uma das cidades estudadas.

Para realizar a simulação com a operação conjunta, deve-se somar o custo do biogás de aterro às despesas, ou seja, a equação (11) é substituída pela equação (25).

$$D = Ccomb + C_{biog\_aterro} + Cinvt.FRC + EEcomp.Pcomp.H \quad (25)$$

Sendo:

D = despesa [US$/ano]

$Ccomb$ = custo do combustível [US$/ano]

C_{biog_aterro}= custo de operação e manutenção [US$/ano]

$Cinvt$ = custo de investimento total dos equipamentos [US$]

$EEcomp$ = potência elétrica possivelmente comprada da concessionária [MW]

$Pcomp$ = preço de compra da energia elétrica [US$/MWh]

H = horas de funcionamento, iguais a 8640 [h/ano]

FRC = fator de amortização de capital [1/ano]

Deve-se também considerar as vazões solicitadas pelos equipamentos e as vazões disponíveis para geração de energia de forma conjunta, ou seja, a vazão solicitada pelos equipamentos agora é a soma da vazão solicitada pelo equipamento operando com biogás de esgotos e operando com biogás de aterro e a vazão disponível para geração de energia agora é a soma da vazão disponível de biogás de esgotos e biogás de aterro para cada uma das cidades estudadas, assim a equações (13), (14) e (15) pode ser substituída pelas equações (26), (27) e (28).

$$m_i + m_j < m_{biogás} + m_{biogás\_aterro} \quad (26)$$

Em que:

m_i = vazão de combustível necessária a cada um dos equipamentos operando com biogás de esgotos

m_j = vazão de combustível necessária a cada um dos equipamentos operando com biogás de aterro

$m_{biogás}$ = vazão de biogás possível de se obter na estação de tratamento de esgotos

$m_{biogás\_aterro}$= vazão de biogás possível de se obter no aterro sanitário

$$y_i = se(m_i + m_j < m_{biogás} + m_{biogás\_aterro}, 1, 0) \quad (27)$$

Em que:

y_i = variável booleana que só será 1 se a vazão necessária pelo equipamento for menor do que a disponibilizada para geração de energia

$$x_i = se(y_i = 1, \frac{m_{biogás} + m_{biogás\_aterro}}{m_i + m_j}, 0) \quad (28)$$

Em que:

x_i = variável inteira que indica a quantidade de equipamentos possíveis para a configuração, se o equipamento atender à condição de necessitar de menos biogás do que a estação provê.

Na simulação realizada com o biogás de aterro operando com o biogás de esgoto para os municípios analisados foram obtidos os resultados referentes à receita [US$/ano], despesa [US$/ano], equipamentos escolhidos e potência gerada [kW] conforme apresentado na Tabela 19.

Tabela 19 - Resultados para modelagem com biogás de aterro

Município	Campinas	Guaratinguetá	Roseira
Receita [US$/ano]	0	0	-
Despesa [US$/ano]	2.854.797	123.250,30	29.262,97
Quantidade de equipamentos	7	3	-
Equipamentos	Motores J208	Microturbina C30	-
Potência necessária [kW]	3060,19	106,53	15,42
Potência gerada [kW]	2345	90	-

Com os resultados obtidos, pode-se observar que tanto em Guaratinguetá quanto em Campinas não houve excedente e consequente venda de energia elétrica, sendo que a energia produzida foi utilizada somente de modo a diminuir a necessidade de compra de energia da concessionária, porém observa-se que com o uso do biogás de aterro com o biogás de esgoto ocorre uma modificação em Guaratinguetá, que passa a operar agora com três microturbinas, gerando 90 kW de potência nesta nova condição, e diminuindo a despesa quando comparado com o cenário 1 (sem biogás de aterro).

Observa-se também que não houve resultados relativos a equipamentos para a cidade de Roseira mesmo somando o biogás de aterro ao biogás de esgoto; isso ocorre porque, embora a vazão de biogás disponível seja maior, o poder calorífico do biogás de aterro é muito baixo (metade do poder calorífico do biogás de esgoto), o que leva a uma necessidade maior de biogás nos equipamentos, mantendo-se, portanto, o maior limitante da modelagem que é a vazão mássica de combustível, no entanto existe a indicação da despesa referente ao custo da produção do biogás de esgoto e da compra de energia elétrica da concessionária para o funcionamento da estação de tratamento de esgotos, porém deve-se atentar para o fato de que o custo relativo ao biogás de aterro em Roseira foi nulo, uma vez que esse custo está relacionado à energia produzida, conforme a literatura.

5.8. Análise comparativa de economia para os municípios estudados

Na Tabela 20, apresenta-se uma análise comparativa para os municípios estudados, uma vez que existe a geração de energia elétrica em Guaratinguetá e Campinas resultando em economia com compra de energia. Portanto, pode-se analisar qual a grandeza desta economia quando comparada com a compra direta da concessionária, considerando o preço de compra de energia elétrica como o valor indicado pela ANEEL BRASIL (2015) no ano de 2015 para tarifa média de fornecimento com tributos para o serviço público (água, esgoto e saneamento) de 415,48 R$/MWh, a cotação do dólar de 3,74 R$/US$ no dia 27/11/2015.

Tabela 20 - Análise comparativa de economia para os municípios estudados

Município	Campinas	Guaratinguetá	Roseira
Potência necessária [kW]	3060,19	106,53	15,42
Compra total da concessionária [US$/ano]	2.937.224	102.249	14.800
Potência gerada nos cenários 1, 2, 3 e 4 [kW]	2345	30	-
Economia devido à energia gerada [US$/ano]	2.250.772	28.794	-
Economia [%]	76,6	28,2	-
Potência gerada na alternativa com cargas parciais na opção ótima [kW]	2566	52	-
Economia devido à energia gerada [US$/ano]	2.462.892	49.910	-
Economia [%]	83,9	48,8	-
Potência gerada na alternativa com biogás de aterro [kW]	2345	90	-
Economia devido à energia gerada [US$/ano]	2.250.772	86.383	-
Economia [%]	76,6	84,5	-

6 CONCLUSÕES

Com a modelagem dos ciclos térmicos e análise dos resultados obtidos pode-se observar que, para cidades do porte de Roseira, não existem equipamentos capazes de gerar energia para a estação de tratamento de esgotos, porém deve-se observar de que existe uma gama maior de equipamentos no mercado com diferentes faixas de potência e consumo de combustível que podem atender a esta cidade e que não foram analisados nessa modelagem. Portanto, com uma análise de outros equipamentos é possível que se encontre algum que atenda às necessidades deste município.

Na análise de sensibilidade do preço de venda de energia elétrica, a função objetivo permaneceu constante para todos os municípios uma vez que não havia excedente e venda de energia elétrica, porém se houvesse esse excedente e venda, a análise de sensibilidade desse preço seria muito importante, interferindo diretamente na receita gerada pela estação de tratamento e, assim, na viabilidade de sua implantação.

Em todas as análises de sensibilidade feitas em diferentes cenários e para todos os municípios é interessante salientar que as soluções encontradas são robustas, ou seja, embora haja variação nas despesas e, assim, na função objetivo, em nenhum caso houve mudança na configuração escolhida inicialmente pela simulação 1, mostrando que para as faixas de valores que houve variação nas diferentes análises de sensibilidade não havia impacto direto na escolha do equipamento nos casos da modelagem.

Com os valores de despesas e geração de energia elétrica obtidos para todos os municípios, pode-se concluir que as estações de tratamento de esgoto analisadas não são autossuficientes com os equipamentos aqui utilizados para modelagem e que geram despesas, devido ao custo destes equipamentos (além do trocador de calor e do secador de lodo que também fazem parte do modelo), custo de produção do combustível e custo da compra de energia elétrica para suprir o restante da necessidade de energia da estação que os equipamentos não conseguiram gerar.

Com a análise dos equipamentos em cargas parciais pode-se confirmar que nenhum dos equipamentos, ainda que operando em cargas parciais, consegue atender a cidade de Roseira devido a sua baixa vazão de biogás gerado, porém pode-se observar que com cargas parciais a despesa em Guaratinguetá e em Campinas pode ser menor, sendo que a melhor configuração para Guaratinguetá é operando com carga de 80% e para Campinas é operando com carga de 90%.

Na análise utilizando-se o biogás de aterro com o biogás de esgoto para geração de energia pode-se observar que embora haja um aumento significativo na vazão mássica total de combustível disponível, há também uma necessidade maior de combustível nos equipamentos e isso ocorre devido ao poder calorífico do biogás de aterro ser baixo, necessitando assim de mais combustível. Uma alternativa que pode ser analisada é, ao fazer o planejamento das cidades, a localização de um aterro que possa receber os resíduos sólidos de mais de uma cidade, ou seja, que receba também os resíduos de cidades vizinhas, aumentando assim a geração de biogás e podendo tornar possível a geração de energia em cidades com menor produção de resíduos e, consequentemente, de biogás.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. **NBR 9648 - Estudo de concepção de sistemas de esgoto sanitário**. Brasil, 1986. Disponível em: <http://www.abntcatalogo.com.br/norma.aspx?ID=079679>. Acesso em: 20/07/16.

ACI . Associação Comercial e Industrial. Cotação do dólar, 2013. Disponível em: <http://www.acinh.com.br/servicos/cotacao-dolar>. Acesso em 24/11/2015.

AGUILAR-VIRGEN, Q.; TABOADA-GONZÁLEZ, P.; OJEDA-BENÍTEZ, S.; CRUZ-SOTELO, S. Power generation with biogas from municipal solid waste: Prediction of gas generation with in situ parameters. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 30, p. 412–419, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113007132>. Acesso em: 29/09/2015.

BASRAWI, M. F. BIN; YAMADA, T.; NAKANISHI, K.; KATSUMATA, H. Analysis of the performances of biogas-fuelled micro gas turbine cogeneration systems (MGT-CGSs) in middle- and small-scale sewage treatment plants: Comparison of performances and optimization of MGTs with various electrical power outputs. **Energy**, v. 38, n. 1, p. 291–304, 2012. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S036054421100795X>. Acesso em: 12/06/2015.

BASRAWI, F.; IBRAHIM, H.; YAMADA, T. Optimal unit sizing of biogas-fuelled micro gas turbine cogeneration systems in a sewage treatment plant. **Energy Procedia**, v. 75, p. 1052-1058, 2015. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1876610215012369>. Acesso em: 29/09/2015.

BEJAN, A., TSATSARONIS, G., MORAN, M. **Thermal design & optimization**. Hoboken: John Wiley, 1996.

BRANCO, P. M. P. **Biodigestão anaeróbia de águas residuárias humanas: composição de biogás e qualidade do efluente**. 2013. 62 f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Estudo de vida útil econômica e taxa de depreciação**, v. 2. Brasil, 2000. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/audiencia/arquivo/2006/012/documento/relatorio_vida_util_volume_2.pdf>. Acesso em: 24/11/15.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. **Resolução normativa número 482 de 17 de abril de 2012.** Brasil, 2012. Disponível em: <http://www.aneel.gov.br>. Acesso em: 24/07/16.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Relatório da tarifa média de fornecimento por classe de consumo. Disponível em: <http://relatorios.aneel.gov.br/_layouts/xlviewer.aspx?id=/RelatoriosSAS/RelSampClasseCon

s.xlsx&Source=http://relatorios.aneel.gov.br/RelatoriosSAS/Forms/AllItems.aspx&DefaultItemOpen=1>. Acesso em: 24/11/2015.

BRASIL. Banco Central do Brasil. Histórico das taxas de juros. Disponível em: <http://www.bcb.gov.br/?COPOMJUROS>. Acesso em: 24/11/2015.

BRASIL. Banco Central do Brasil. Conversão de moedas. Disponível em: <http://www4.bcb.gov.br/pec/conversao/conversao.asp>. Acesso em: 27/11/2015.

BRUNO, J. C.; ORTEGA-LÓPEZ, V.; CORONAS, A. Integration of absorption cooling systems into micro gas turbine trigeneration systems using biogas: Case study of a sewage treatment plant. **Applied Energy**, v. 86, n. 6, p. 837–847, 2009. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261908001980>. Acesso em: 12/06/2015.

CAPSTONE TURBINE CORPORATION. 2015. Disponível em: <http://www.capstoneturbine.com/products>. Acesso em: 12/05/15.

CENTRO NACIONAL DE REFERÊNCIA EM BIOMASSA - CENBIO. **Projeto instalação e testes de uma unidade de demonstração de geração de energia elétrica a partir de biogás de tratamento de esgoto (ENERG-BIOG)**. Relatório Técnico final. São Paulo: ENERG, 2004. 222 p.

CHEN, S.; CHEN, B. Net energy production and emissions mitigation of domestic wastewater treatment system: A comparison of different biogas–sludge use alternatives. **Bioresource Technology**, v. 144, p. 296–303, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960852413010572>. Acesso em: 29/09/2015.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; MARTINS, O. S.; ABREU, F. C. de. **Biogas from Sewage Treatment used to Electric Energy Generation, by a 30 kW (ISO) Microturbine.** São Paulo. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2006.

COELHO, S. T.; MONTEIRO, M. B.; GHILARDI, A.; KARNIOL, M. R. **Atlas de bioenergia do Brasil**. São Paulo. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2008.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; PECORA, V. **Aproveitamento do biogás proveniente dos resíduos sólidos urbanos para geração de energia elétrica: estudo de caso em São Paulo.** São Paulo. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2009.

COELHO, S. T.; VELÁZQUEZ, S. M. S. G.; SILVA, O. C.; PECORA, V.; ABREU, F. C. de. **The Production of Sewage Biogas and its Use for Energy Generation**. São Paulo. CENBIO – Centro Nacional de Referência em Biomassa, 2006.

COLLARES PEREIRA, M. **Energias renováveis, a opção inadiável**. Lisboa: Sociedade Portuguesa de Energia Solar - SPES, 1998. 256 p.

COMGÁS Natural. Inova: Projeto Biogás. Brasil, 2016. Disponível em: <http://www.comgas.com.br/pt/empresa/Inovacao/Inovacao2014/Comg%C3%A1s%20-%20Carlos%20Zanardo/Efici%C3%AAncia%20Energ%C3%A9tica%20e%20Sustentabilidade%20-%20Biog%C3%A1s.pdf>. Acesso em: 24/04/2016.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO - CETESB. **Inventário estadual de resíduos sólidos urbanos**. São Paulo: CETESB, 2015. 124 p.

COSTA, D.F. **Geração de energia elétrica a partir do biogás do tratamento de esgoto**. 2006. 194 f. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

FRANÇA JUNIOR, A. T. **Análise do aproveitamento energético do biogás produzido numa estação de tratamento de esgoto.** 2008. 148 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2008.

FUNASA. **Manual de Saneamento.** 2004. 408 f. 3ª. Edição revisada. Fundação Nacional de Saúde, Brasília, 2004.

FUNASA. **Manual de Saneamento.** 2015. 642 f. 4ª. edição. Fundação Nacional de Saúde, Brasília, 2015.

GENERAL ELETRIC. Reciprocating Engines. Disponível em: <https://powergen.gepower.com/products/reciprocating-engines.html>. Acesso em: 12/05/2015.

GHG. Greenouse Gas Protocol. **Metodologia do GHG Protocol da agricultura**. Disponível em: <http://www.ghgprotocol.org/files/ghgp/Metodologia.pdf>. Acesso em: 24/11/2015.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, Brasil, 2010. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em: 14/12/2015.

IPCC. Intergovernmental Panel of Climate Change, 1996. **Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manual and Workbook**. Disponível em: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/guidelin/ch6wb1.pdf>. Acesso em: 01/05/2016.

IPCC. Intergovernmental Panel of Climate Change, 2007. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg1/en/ch2s2-10-2.html>. Acesso em: 29/11/2015.

JORDÃO, E. P.; PESSÔA, C. A. **Tratamento de esgotos domésticos**. São Paulo: Ed. ABES, 2009.

KHAN, E. U.; MAINALI, B.; MARTIN, A.; SILVEIRA, S. Techno-economic analysis of small scale biogas based polygeneration systems: Bangladesh case study. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 7, p. 68–78, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138814000319>. Acesso em: 29/09/2015.

KOTHARI, R.; PANDEY A.K.; KUMAR, S.; TYAGI, V.V.; TYAGI, S.K. Different aspects of dry anaerobic digestion for bio-energy: An overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 39, p. 174-195, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032114004638>. Acesso em: 12/06/2015.

LINDO SYSTEMS INC. Software LINGO, versão 10, 2006. Disponível em: <http://www.lindo.com/index.php?option=com_content&view=article&id=2&Itemid=10>. Acesso em: 24/11/15.

MILLS, N.; PEARCE, P.; FARROW, J.; THORPE, R. B.; KIRKBY, N. F. Environmental & economic life cycle assessment of current & future sewage sludge to energy technologies. **Waste Management**, v. 34, p. 185–195, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0956053X13003978>. Acesso em: 29/09/2015.

PAMPLONA, E.O., MONTEVECHI, J.A.B. **Engenharia Econômica I**, UNIFEI, 2006. Disponível em: <http://www.iepg.unifei.edu.br/edson/download/Apostee1.PDF>. Acesso em: 21/03/2016.

PECORA, V. **Implementação de uma unidade demonstrativa de geração de energia elétrica a partir do biogás de tratamento do esgoto residencial da USP: Estudo de caso**. 2006. 153 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Inter-unidades de Pós-Graduação em Energia (PIPGE), Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

PERGHER, G. D. **Obtenção de biometano através da purificação do biogás por P.S.A.** 3ª Edição da Conferência Biogás-Biometano, São Paulo, 2015. Disponível em: <http://janusperghe r.com.br/produto/purificador-de-biogas/>. Acesso em: 21/03/2016.

PESQUISA NACIONAL DE SANEAMENTO BÁSICO. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. 218 p. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/condicaodevida/pnsb2008/PNSB_2008.pdf>. Acesso em: 12/06/2015.

SALOMON, K. R.; FILHO, G. L. T. **Série Energias Renováveis: Biomassa**, 1ª ed., Itajubá, 2007. Disponível em: <http://cerpch.unifei.edu.br/wp-content/uploads/cartilhas/cartilhas-energias-renovaveis-biomassa.pdf>. Acesso em: 12/07/2016.

SANTOS, I. F. S.; BARROS, R. M.; FILHO, G. L. T. Electricity generation from biogas of anaerobic wastewater treatment plants in Brazil: an assessment of feasibility and potencial. **Journal of Cleaner Production**, v. 126, p. 504-514, 2016. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652616301408>. Acesso em: 12/07/2016.

SILVA, F. M. **Biogás de lixo no aterro sanitário de Gramacho**. 2015. 124 f. Trabalho de conclusão de curso – Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

SNIS. Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Brasil, 2013. Disponível em: <http://www.snis.gov.br/diagnostico-agua-e-esgotos/diagnostico-ae-2013>. Acesso em: 24/11/2015.

SGC. Swedish Gas Technology Centre, 2012. **Basic data on biogas**. Disponível em: <http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/BasicDataonBiogas2012.pdf>. Acesso em: 04/05/2016.

TYAGI, V.K.; LO, S. Sludge: A waste or renewable source for energy and resources recovery? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 25, p. 708-728, 2013. Elsevier Ltd. Disponível em:<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032113003328>. Acesso em: 12/06/2015.

VAN HAANDEL, A. C. Influence of the digested cod concentration on the alkalinity requirement in anaerobic digesters, **Water Science Tech.**, n.30, 23-24, 1994.

VAN HAANDEL, A. C., LETTINGER, G. **Tratamento Anaeróbico de Esgotos: Um Manual para Regiões de Clima Quente**, Epgraf, Campina Grande, 240 p, 1994.

VESCOVO, E. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <sylvia.leite@gmail.com> em 19 janeiro 2015.

VESCOVO, E. [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <sylvia.leite@gmail.com> em 18 abril 2016.

YINGJIAN, L.; QI, Q.; XIANGZHU, H.; JIEZHI, L. Energy balance and efficiency analysis for power generation in internal combustion engine sets using biogas. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 6, p. 25–33, 2014. Elsevier Ltd. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138814000046>. Acesso em: 29/09/2015.

ANEXO A – MODELAGEM DE REFERÊNCIA

Modelagem no software LINGO para a cidade de Campinas considerando todos os dados referentes ao município e aos equipamentos, além de utilizar o preço de compra de energia elétrica como o valor indicado pela ANEEL no ano de 2015 para tarifa média de fornecimento com tributos para o serviço público (água, esgoto e saneamento) de R$ 415,48/MWh, a cotação do dólar de R$ 3,74/US$ no dia 27/11/2015, preço de venda de energia elétrica como 70% do preço de compra de energia elétrica e taxa de juros de 14,15% conforme indicado pelo Banco Central do Brasil como taxa média anual para 2015. A modelagem abaixo serve como referência para todas as modelagens realizadas neste trabalho.

```
!Cidade_Campinas;

MODEL:

DATA:
mbio=0.251599; ![kg/s];
EEpl=3060.188; ![kW];
Pcomp=111.09;  !US$/MWh;
Pvend=77.763;  !US$/MWh, 0.7% da compra;
FRC=0.164;  !taxa de juros de 14.15% e tempo de amortização de 15 anos;
ENDDATA

[FO] Max = R-D;
[Receita] R=EEvend/1000*Pvend*8640;  !(US$/ano);
[Despesa] D=Cbio+Cinvt*FRC+EEcomp/1000*Pcomp*8640;  !(US$/ano);

[Vazao_unitaria_C30] mcc30u=0.0044; ![kg/s];
[Quantidade_equipamentos_C30] y1=@if(mcc30u#LE#mbio, mbio/mcc30u, 0);
[Potencia_C30_inicial] Wc30i=30*y1;
[Potencia_C30_final] Wc30=30*y1*x1;
x1=@IF(EEprod#EQ#Wc30i,1,0);
[Vazao_C30] mcc30=y1*mcc30u*x1;

[Vazao_unitaria_C65] mcc65u=0.0086; ![kg/s];
[Quantidade_equipamentos_C65] y2=@if(mcc65u#LE#mbio, mbio/mcc65u, 0);
[Potencia_C65_inicial] Wc65i=65*y2;
[Potencia_C65_final] Wc65=65*y2*x2;
x2=@IF(EEprod#EQ#Wc65i,1,0);
[Vazao_C65] mcc65=y2*mcc65u*x2;

[Vazao_unitaria_C200] mcc200u=0.0232; ![kg/s];
[Quantidade_equipamentos_C200] y3=@if(mcc200u#LE#mbio, mbio/mcc200u, 0);
[Potencia_C200_inicial] Wc200i=200*y3;
[Potencia_C200_final] Wc200=200*y3*x3;
x3=@IF(EEprod#EQ#Wc200i,1,0);
[Vazao_C200] mcc200=y3*mcc200u*x3;

[Vazao_unitaria_C600] mcc600u=0.0696; ![kg/s];
[Quantidade_equipamentos_C600] y4=@if(mcc600u#LE#mbio, mbio/mcc600u, 0);
[Potencia_C600_inicial] Wc600i=600*y4;
[Potencia_C600_final] Wc600=600*y4*x4;
x4=@IF(EEprod#EQ#Wc600i,1,0);
```

```
[Vazao_C600] mcc600=y4*mcc600u*x4;

[Vazao_unitaria_C800] mcc800u=0.0928; ![kg/s];
[Quantidade_equipamentos_C800] y5=@if(mcc800u#LE#mbio, mbio/mcc800u, 0);
[Potencia_C800_inicial] Wc800i=800*y5;
[Potencia_C800_final] Wc800=800*y5*x5;
x5=@IF(EEprod#EQ#Wc800i,1,0);
[Vazao_C800] mcc800=y5*mcc800u*x5;

[Vazao_unitaria_C1000] mcc1000u=0.116; ![kg/s];
[Quantidade_equipamentos_C1000] y6=@if(mcc1000u#LE#mbio, mbio/mcc1000u, 0);
[Potencia_C1000_inicial] Wc1000i=1000*y6;
[Potencia_C1000_final] Wc1000=1000*y6*x6;
x6=@IF(EEprod#EQ#Wc1000i,1,0);
[Vazao_C1000] mcc1000=y6*mcc1000u*x6;

[Vazao_unitaria_J208] mcj208u=0.035; ![kg/s];
[Quantidade_equipamentos_J208] y7=@if(mcj208u#LE#mbio, mbio/mcj208u, 0);
[Potencia_J208_inicial] Wj208i=335*y7;
[Potencia_J208_final] Wj208=335*y7*x7;
x7=@IF(EEprod#EQ#Wj208i,1,0);
[Vazao_J208] mcj208=y7*mcj208u*x7;

[Vazao_unitaria_J320] mcj320u=0.103; ![kg/s];
[Quantidade_equipamentos_J320] y8=@if(mcj320u#LE#mbio, mbio/mcj320u, 0);
[Potencia_J320_inicial] Wj320i=1059*y8;
[Potencia_J320_final] Wj320=1059*y8*x8;
x8=@IF(EEprod#EQ#Wj320i,1,0);
[Vazao_J320] mcj320=y8*mcj320u*x8;

[Vazao_unitaria_J420] mcj420u=0.135; ![kg/s];
[Quantidade_equipamentos_J420] y9=@if(mcj420u#LE#mbio, mbio/mcj420u, 0);
[Potencia_J420_inicial] Wj420i=1426*y9;
[Potencia_J420_final] Wj420=1426*y9*x9;
x9=@IF(EEprod#EQ#Wj420i,1,0);
[Vazao_J420] mcj420=y9*mcj420u*x9;

[Vazao_biodigestor_C30] mabiodc30=1.23*y1*x1; ![kg/s];
[Vazao_biodigestor_C65] mabiodc65=2.41*y2*x2; ![kg/s];
[Vazao_biodigestor_C200] mabiodc200=5.36*y3*x3; ![kg/s];
[Vazao_biodigestor_C600] mabiodc600=16.49*y4*x4; ![kg/s];
[Vazao_biodigestor_C800] mabiodc800=21.85*y5*x5; ![kg/s];
[Vazao_biodigestor_C1000] mabiodc1000=27.62*y6*x6; ![kg/s];
[Vazao_biodigestor_J208] mabiodj208=5.29*y7*x7; ![kg/s];
[Vazao_biodigestor_J320] mabiodj320=13.79*y8*x8; ![kg/s];
[Vazao_biodigestor_J420] mabiodj420=17.10*y9*x9; ![kg/s];

[Custo_Combust] Cbio=1783849;
[Custo_C30] Cc30=103585*y1*x1; ! [US$];
[Custo_C65] Cc65=177072*y2*x2; ! [US$];
[Custo_C200] Cc200=557579*y3*x3; ! [US$];
[Custo_C600] Cc600=1562338*y4*x4; ! [US$];
[Custo_C800] Cc800=2013772*y5*x5; ! [US$];
[Custo_C1000] Cc1000=2467960*y6*x6; ! [US$];
[Custo_J208] Cj208=334610.44*y7*x7; ! [US$];
[Custo_J320] Cj320=850000*y8*x8; ! [US$];
[Custo_J420] Cj420=1081658.12*y9*x9; ! [US$];
[Custo_total] Cinvt=(Cc30+Cc65+Cc200+Cc600+Cc800+Cc1000+Cj208+Cj320+Cj420);
! [US$];
```

```
[Energia_produzida]
EEprod=@SMAX(Wc30i,Wc65i,Wc200i,Wc600i,Wc800i,Wc1000i,Wj208i,Wj320i,Wj420i)
;
[Energia_planta] EEcomp-EEvend+EEprod=EEpl;

END
```

ANEXO B – EQUIPAMENTOS UTILIZADOS NO TRABALHO

Model	Fuels	Power Output[1]	Electrical Efficiency	Exhaust Gas Flow		Exhaust Temperature		Net Heat Rate		Dimensions[2] (W x D x H)	
		kW	%	kg/s	lbm/s	C°	F°	MJ/kWh	btu/kWh	m	in
GASEOUS FUELS[3]											
C30 LP	NG	28	25	0.31	0.68	275	530	13.8	13,100	0.76 x 1.5 x 1.8	30 x 60 x 70
C30 HP	NG, P, LG, DG	30	26	0.31	0.68	275	530	13.8	13,100	0.76 x 1.5 x 1.8	30 x 60 x 70
C30 HZLC[4]	NG	30	26	0.32	0.70	275	530	13.8	13,100	0.87 x 2.9 x 2.2	34 x 112 x 85
C65	NG, P	65	29	0.49	1.08	309	588	12.4	11,800	0.76 x 1.9 x 1.8	30 x 77 x 76
C65 ICHP	NG, P, LG, DG	65	29	0.49	1.08	309	588	12.4	11,800	0.76 x 2.2 x 2.4	30 x 87 x 93
C65 CARB	NG	65	28	0.51	1.13	311	592	12.9	12,200	0.76 x 2.2 x 2.6	30 x 87 x 103
C65 CARB	LG, DG	65	29	0.49	1.08	309	588	12.4	11,800	0.76 x 2.2 x 2.6	30 x 77 x 85
C65 HZLC[4]	NG	65	29	0.50	1.09	325	617	12.9	12,200	0.87 x 3.2 x 2.3	35 x 128 x 90
C200 LP	NG	190	31	1.3	2.9	280	535	11.6	11,000	1.7 x 3.8 x 2.5	67 x 150 x 98
C200 HP	NG, P, LG, DG	200	33	1.3	2.9	280	535	10.9	10,300	1.7 x 3.8 x 2.5	67 x 150 x 98
C200 HZLC[4]	NG	200	33	1.3	2.9	280	535	10.9	10,300	1.9 x 3.2 x 3.1	74 x 126 x 122
C600 LP	NG	570	31	4.0	8.8	280	535	11.6	11,000	2.4 x 9.1 x 2.9	96 x 360 x 114
C600 HP	NG, P, LG, DG	600	33	4.0	8.8	280	535	10.9	10,300	2.4 x 9.1 x 2.9	96 x 360 x 114
C800 LP	NG	760	31	5.3	11.7	280	535	11.6	11,000	2.4 x 9.1 x 2.9	96 x 360 x 114
C800 HP	NG, P, LG, DG	800	33	5.3	11.7	280	535	10.9	10,300	2.4 x 9.1 x 2.9	96 x 360 x 114
C1000 LP	NG	950	31	6.7	14.7	280	535	11.6	11,000	2.4 x 9.1 x 2.9	96 x 360 x 114
C1000 HP	NG, P, LG, DG	1000	33	6.7	14.7	280	535	10.9	10,300	2.4 x 9.1 x 2.9	96 x 360 x 114
LIQUID FUELS[5]											
C30	D, A, K	29	25	0.31	0.69	275	530	14.4	13,700	0.76 x 1.5 x 1.9	30 x 60 x 70
C65	D, A, K	65	29	0.49	1.08	309	588	12.4	11,800	0.76 x 1.9 x 1.8	30 x 77 x 76
C65 ICHP	D, A, K	65	29	0.49	1.08	309	588	12.4	11,800	0.76 x 2.2 x 2.4	30 x 87 x 93
C200	D	190	30	1.3	2.9	280	535	10.9	10,300	1.7 x 3.8 x 2.5	67 x 150 x 98

[1] Nominal full power performance at ISO conditions: 59° F, 14.696 psia, 60% RH
[2] Height dimensions are to the roofline. Exhaust outlet can extend up to 7 inches above the roofline.
[3] Models available to operate on these different fuels: NG – Natural Gas; P – Propane; LG – Landfill Gas; DG – Digester Gas
[4] Hazardous Location units suitable for use in potentially explosive atmospheres (UL Class I, Division 2 or Atex Class I, Zone 2)
[5] Models available to operate on these different fuels: D – Diesel; A – Aviation; K – Kerosene
Specifications are not warranted and are subject to change without notice.

Fonte: Capstone (2015)

ISO Partial Load Performance

Performance at partial load and ISO ambient conditions for the Capstone Model C30 MicroTurbine operating on high pressure natural gas fuel is presented in Table 7. These values are estimated from nominal performance curves.

Table 7. Partial Load Performance at ISO Ambient Conditions

Net Power (kW)	Net Efficiency (%)	Exhaust Temp (F)	Exhaust Mass Flow Rate (lbm/s)	Exhaust Energy (Btu/hr)	Fuel Flow Energy (Btu/hr LHV)	Heat Rate (Btu/kWhr LHV)
2.0	8.8	395	0.24	74700	77900	38900
3.0	11.5	386	0.27	81900	89000	29700
4.0	13.6	392	0.29	90200	100000	25100
5.0	15.2	398	0.31	98700	112000	22400
6.0	16.6	405	0.33	107000	123000	20600
7.0	17.7	411	0.35	115000	135000	19200
8.0	18.8	416	0.37	123000	145000	18200
9.0	19.8	421	0.38	130000	155000	17300
10.0	20.6	426	0.40	138000	166000	16600
11.0	21.2	432	0.41	145000	177000	16100
12.0	21.8	438	0.43	153000	188000	15600
13.0	22.3	443	0.44	161000	199000	15300
14.0	22.8	448	0.46	169000	209000	15000
15.0	23.2	454	0.47	177000	220000	14700
16.0	23.6	459	0.49	185000	231000	14400
17.0	24.0	464	0.50	193000	242000	14200
18.0	24.3	468	0.52	201000	253000	14000
19.0	24.6	473	0.53	209000	263000	13900
20.0	24.9	478	0.54	217000	274000	13700
21.0	25.1	483	0.56	226000	286000	13600
22.0	25.3	488	0.57	234000	297000	13500
23.0	25.4	493	0.58	243000	308000	13400
24.0	25.6	498	0.60	252000	320000	13300
25.0	25.7	503	0.61	261000	332000	13300
26.0	25.8	509	0.63	271000	344000	13200
27.0	25.8	514	0.64	281000	357000	13200
28.0	25.9	518	0.65	290000	368000	13200
29.0	26.0	523	0.67	299000	381000	13100
30.0	26.0	529	0.68	310000	394000	13100

Fonte: Vescovo (2016)

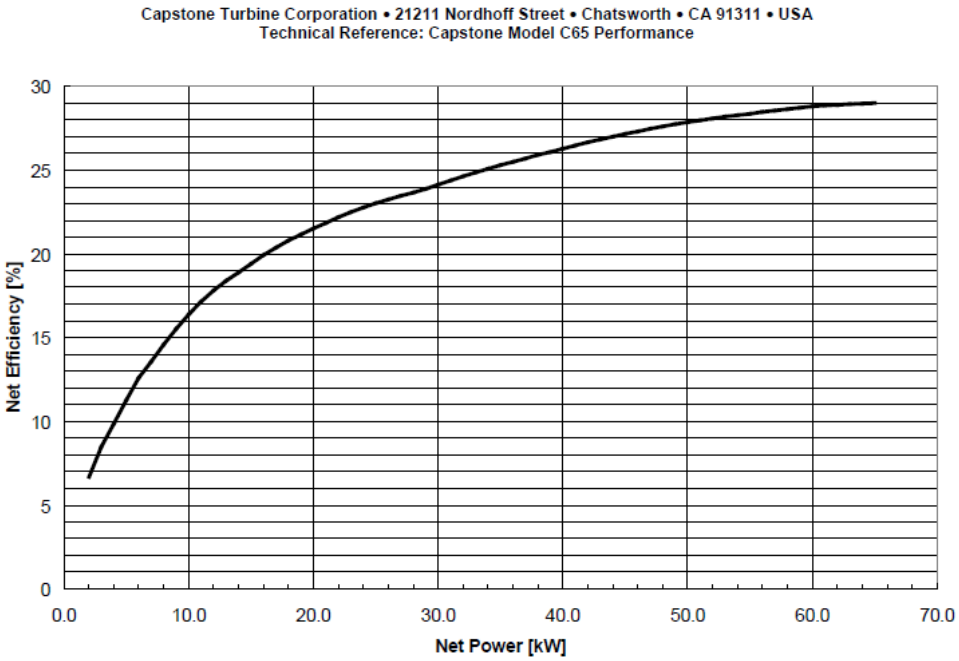


Figure 5. Partial Load Efficiency Vs Net Power at ISO Conditions

Fonte: Vescovo (2016)

ISO partial load efficiency vs. net power for the C200 high pressure natural gas model is shown in Figure 7-3. These values are estimated from nominal performance at ISO conditions.

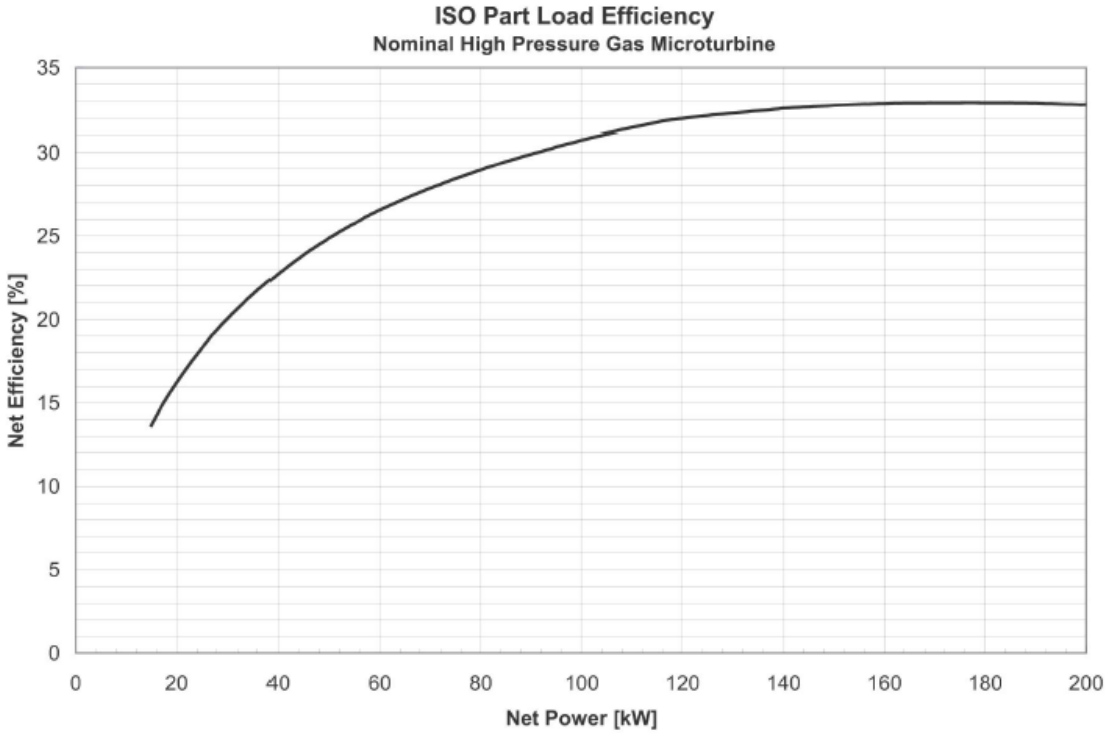


Figure 7-3. ISO Partial Load Efficiency Vs Net Power (Nominal)

Fonte: Vescovo (2016)

technical data

Configuration	In line
Bore (mm)	135
Stroke (mm)	145
Displacement/cylinder (lit)	2.08
Speed (rpm)	1,500 (50 Hz) 1,800 (60 Hz)
Mean piston speed (m/s)	7.3 (1,500 rpm) 8.7 (1,800 rpm)
Scope of supply	Generator set, cogeneration system, generator set/cogeneration in container
Applicable gas types	Natural gas, flare gas, propane, biogas, landfill gas, sewage gas.
Engine type	J208
No. of cylinders	8
Total displacement (lit)	16.6

Dimensions l x w x h (mm)	
Generator set	4,900 x 1,700 x 2,000
Cogeneration system	4,900 x 1,700 x 2,000
Container 20-foot (generator set)	6,100 x 2,500 x 2,800
Container 40-foot (cogeneration)	12,200 x 2,500 x 2,800

Weights empty (kg)	
Generator set	4,900
Cogeneration system	5,600
Container 20-foot (generator set)	13,100
Container 40-foot (cogeneration)	17,000

outputs and efficiencies

Natural gas

		1,500 rpm | 50 Hz					1,800 rpm | 60 Hz				
NOx <	Type	Pel (kW)[1]	ηel (%)[1]	Pth (kW)[2]	ηth (%)[2]	ηtot (%)	Pel (kW)[1]	ηel (%)[1]	Pth (kW)[2]	ηth (%)[2]	ηtot (%)
500 mg/m³N	208	311	38.2	409	52.1	90.3	335	37.2	423	47.0	84.2
	208	330	38.7	371	43.6	82.3					
250 mg/m³N	208	305	37.6	410	52.5	90.1	335	35.9	423	45.3	81.2

Biogas

		1,500 rpm | 50 Hz					1,800 rpm | 60 Hz				
NOx <	Type	Pel (kW)[1]	ηel (%)[1]	Pth (kW)[2]	ηth (%)[2]	ηtot (%)	Pel (kW)[1]	ηel (%)[1]	Pth (kW)[2]	ηth (%)[2]	ηtot (%)
500 mg/m³N	208	330	38.7	413	48.5	87.3	335	41.0	402	44.4	80.6
	208	248	38.9	307	48.2	87.1					

1) Technical data according to ISO 3046
2) Total heat output with a tolerance of +/- 8%, exhaust gas outlet temperature 120°C, for biogas exhaust gas outlet temperature 180°C
All data according to full load and subject to technical development and modification.
Further engines versions available on request.

Fonte: General Eletric (2015)

technical data

Configuration	V 70°
Bore [mm]	135
Stroke [mm]	170
Displacement/cylinder [lt]	2.43
Speed [rpm]	1,500 [50 Hz] 1,200/1,800 [60 Hz]
Mean piston speed [m/s]	8.5 [1,500 rpm] 6.8 [1,200 rpm] 10.2 [1,800 rpm]
Scope of supply	Generator set, cogeneration system, generator set/cogeneration in container
Applicable gas types	Natural gas, flare gas, propane, biogas, landfill gas, sewage gas. Special gases (e.g., coal mine gas, coke gas, wood gas, pyrolysis gas)

Engine type	J312	J316	J320
No. of cylinders	12	16	20
Total displacement [lt]	29.2	38.9	48.7

Dimensions l x w x h [mm]

Generator set	J312	4,700 x 1,800 x 2,300
	J316	5,200 x 1,800 x 2,300
	J320	5,700 x 1,700 x 2,300
Cogeneration system	J312	4,700 x 2,300 x 2,300
	J316	5,300 x 2,300 x 2,300
	J320	5,700 x 1,900 x 2,300
Container	J312	12,200 x 2,500 x 2,600
	J316	12,200 x 2,500 x 2,600
	J320	12,200 x 2,500 x 2,600

Weights empty [kg]

	J312	J316	J320
Generator set	8,000	8,800	10,500
Cogeneration system	9,400	9,900	11,000
Container (generator set)	19,400	22,100	26,000
Container (cogeneration)	20,800	23,200	26,500

outputs and efficiencies

Natural gas

		1,500 rpm | 50 Hz					1,800 rpm | 60 Hz					1,200 rpm | 60 Hz				
NOx <	Type	Pel BAV[1]	ηel (%)[1]	Pth BAV[2]	ηth (%)[2]	ηtot (%)	Pel BAV[1]	ηel (%)[1]	Pth BAV[2]	ηth (%)[2]	ηtot (%)	Pel BAV[1]	ηel (%)[1]	Pth BAV[2]	ηth (%)[2]	ηtot (%)
	J312	405	40.5	474	47.5	88.0										
	J312	527	40.4	626	47.9	88.3										
500 mg/m³ₙ	J312	637	41.1	754	47.4	88.4	633	38.1	851	50.0	88.1	435	39.7	516	47.1	86.8
	J316	850	41.1	979	47.4	88.5	848	38.3	1,006	45.4	83.7	583	40.3	680	47.0	87.2
	J320	1,063	40.8	1,259	47.6	88.4	1,059	39.0	1,324	48.8	87.8	795	40.7	896	45.9	86.7
	J312	637	39.6	758	47.3	87.1	633	36.8	895	51.9	88.7					
250 mg/m³ₙ	J316	850	39.8	1,011	47.5	87.2	848	36.9	1,185	51.6	88.5					
	J320	1,063	39.8	1,291	48.3	88.1	1,059	38.1	1,416	51.0	89.1					
	J312	637	40.4	754	47.8	88.2						418	38.6	519	48.0	86.6
350 mg/m³ₙ	J316	827	39.2	1,006	49.1	88.4						559	38.7	690	47.8	86.6
	J320	1,095	40.1	1,270	47.9	88.1						730	39.2	894	47.9	87.1

Biogas

		1,500 rpm | 50 Hz					1,800 rpm | 60 Hz				
NOx <	Type	Pel BAV[1]	ηel (%)[1]	Pth BAV[2]	ηth (%)[2]	ηtot (%)	Pel BAV[1]	ηel (%)[1]	Pth BAV[2]	ηth (%)[2]	ηtot (%)
	J312	548	41.8	573	43.7	85.4	633	38.1	810	48.8	86.9
	J312	637	40.7	702	44.9	85.6					
500 mg/m³ₙ	J316	725	40.5	774	40.5	81.1	848	38.3	1,040	47.0	85.2
	J316	850	40.7	935	44.8	85.6					
	J320	1,063	40.8	1,137	43.6	84.4	1,059	39.0	1,321	48.6	87.6
	J312						657	36.8	860	49.9	86.7
250 mg/m³ₙ	J316						848	36.9	1,097	47.8	84.7
	J320						1,059	36.9	1,352	50.6	87.5
	J312	637	39.3	730	45.1	84.4					
350 mg/m³ₙ	J316										
	J320	1,063	40.1	1,166	43.9	84.0					

1: technical data according to ISO 3046
2: total heat output with a tolerance of +/- 8%, exhaust gas outlet temperature 120°C, for biogas exhaust gas outlet temperature 180°C
All data according to full load and subject to technical development and modification.
Further engines versions available on request.

Fonte: General Eletric (2015)

0.01 Technical Data (at genset)

Data at:				Full load	Part Load	
Fuel gas LHV		kWh/Nm³		5		
				100%	75%	50%
Energy input		kW	[2]	2.607	2.009	1.410
Gas volume		Nm³/h	*)	521	402	282
Mechanical output		kW	[1]	1.095	821	548
Electrical output		kW el.	[4]	1.063	796	529
Heat to be dissipated			[5]			
~ Intercooler 1st stage (Engine jacket water cooling circuit)		kW		165		
~ Intercooler 2nd stage (Low temperature circuit)		kW		86		
~ Lube oil (Engine jacket water cooling circuit)		kW		118		
~ Jacket water		kW		305		
~ Surface heat	ca.	kW	[7]	82		
~ Balance heat		kW		50		
Spec. fuel consumption of engine		kWh/kWh	[2]	2,38	2,45	2,57
Lube oil consumption	ca.	kg/h	[3]	0,33	~	~
Electrical efficiency		%		40,8%	39,6%	37,5%

*) approximate value for pipework dimensioning
[_] Explanations: see 0.10 - Technical parameters

All heat data is based on standard conditions according to attachment 0.10. Deviations from the standard conditions can result in a change of values within the heat balance, and must be taken into consideration in the layout of the cooling circuit/equipment (intercooler; emergency cooling; ...). In the specifications in addition to the general tolerance of +/- 8% on the thermal output a further reserve of 10% is recommended for the dimensioning of the cooling requirements.

Fonte: General Eletric (2015)

technical data

Configuration	V 70°
Bore (mm)	145
Stroke (mm)	185
Displacement/cylinder (lit)	3.06
Speed (rpm)	1,800 / 1,200 (60 Hz) 1,500 (50 Hz)
Mean piston speed (m/s)	7.4 (1,200 rpm) 9.3 (1,500 rpm)
Scope of supply	Generator set, cogeneration system, generator set/cogeneration in container
Applicable gas types	Natural gas, flare gas, biogas, landfill gas, sewage gas. Special gases (e.g., coal mine gas, coke gas, wood gas, pyrolysis gas)

Engine type	J412	J416	J420
No. of cylinders	12	16	20
Total displacement (lit)	36.7	48.9	61.1

Dimensions l x w x h (mm)

Generator set	J412	5,400 x 1,800 x 2,200
	J416	6,200 x 1,800 x 2,200
	J420	7,100 x 1,900 x 2,200
Cogeneration system	J412	6,000 x 1,800 x 2,200
	J416	6,700 x 1,800 x 2,200
	J420	7,100 x 1,800 x 2,200
Container	J412	12,200 x 3,000 x 2,600
	J416	12,200 x 3,000 x 2,600
	J420	12,200 x 3,000 x 2,600

Weights empty (kg)

	J412	J416	J420
Generator set	10,900	12,500	14,400
Cogeneration system	11,500	13,100	15,000
Container (generator set)	28,200	30,300	35,600
Container (cogeneration)	28,800	30,900	35,000

outputs and efficiencies

Natural gas

		1,500 rpm | 50 Hz					1,800 rpm | 60 Hz					1,200 rpm | 60 Hz				
NOx <	Type	Pel (kW)[1]	ηel (%)[1]	Pth (kW)[2]	ηth (%)[2]	ηtot (%)	Pel (kW)[1]	ηel (%)[1]	Pth (kW)[2]	ηth (%)[2]	ηtot (%)	Pel (kW)[1]	ηel (%)[1]	Pth (kW)[2]	ηth (%)[2]	ηtot (%)
500 mg/m³N	412	889	42.8	918	44.2	87.1	850	41.1	973	47.1	88.2	634	43.0	618	41.9	84.9
	416	1,189	43.0	1,223	44.2	87.1	1,137	41.3	1,298	47.1	88.4	850	43.3	824	41.9	85.2
	420	1,487	43.0	1,528	44.2	87.1	1,426	41.4	1,623	47.1	88.6	1,063	43.3	1,028	41.8	85.1
250 mg/m³N	412	889	42.1	944	44.7	86.9	850	40.0	1,008	47.4	87.4	634	42.1	640	42.5	84.5
	416	1,189	42.3	1,259	44.7	87.0	1,137	40.1	1,343	47.4	87.5	850	42.3	856	42.6	84.9
	420	1,487	42.3	1,573	44.7	87.0	1,426	40.3	1,680	47.4	87.7	1,063	42.3	1,084	43.2	85.5
350 mg/m³N	412	889	42.1	932	44.2	86.3										
	416	1,189	42.3	1,242	44.1	86.4										
	420	1,486	42.3	1,553	44.1	86.5										

Biogas

		1,500 rpm | 50 Hz					1,800 rpm | 60 Hz				
NOx <	Type	Pel (kW)[1]	ηel (%)[1]	Pth (kW)[2]	ηth (%)[2]	ηtot (%)	Pel (kW)[1]	ηel (%)[1]	Pth (kW)[2]	ηth (%)[2]	ηtot (%)
500 mg/m³N	412	889	42.0	905	42.8	84.8	850	40.0	944	44.4	84.5
	416	1,189	42.1	1,207	42.8	84.9	1,137	40.2	1,259	44.5	84.7
	420	1,487	42.2	1,487	42.2	83.2	1,426	40.3	1,572	44.4	84.7
250 mg/m³N	412	889	41.6	918	43.0	84.6	850	39.2	975	44.9	84.1
	416	1,189	41.7	1,189	42.9	84.7	1,137	39.3	1,302	45.0	84.2
	420	1,487	41.8	1,487	41.1	82.9	1,426	39.4	1,627	45.0	84.4

1) Technical data according to ISO 3046
2) Total heat output with a tolerance of +/- 8%, exhaust gas outlet temperature 120°C, for biogas exhaust gas outlet temperature 180°C
All data according to full load and subject to technical development and modification.
Further engines versions available on request.

Fonte: General Eletric (2015)