

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE
A PARTIR DE GÁS NATURAL E RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS

por

Alexandre Santi

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, dezembro de 2012.



Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO DA EFICIÊNCIA DA GERAÇÃO DE ELETRICIDADE
A PARTIR DE GÁS NATURAL E RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS
por

Alexandre Santi

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS
REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Prof. Prof. Dr. Arnaldo Ruben Gonzalez
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Energia e Fenômenos de Transporte

Orientador: Dra. Marina Seelig

Coorientador: Prof. Dr. Paulo Smith Schneider

Comissão de Avaliação:

Prof. Jorge Rodolfo Silva Zabadal

Prof. Flávio Tadeu Van Der Lan

Prof. Sergio Luiz Fray

Porto Alegre, 17 de dezembro de 2012.

“O único lugar onde o sucesso vem antes do trabalho é no dicionário.”

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente aos meus pais, por darem todo o apoio, as condições e o carinho para que eu pudesse realizar este trabalho, entendendo a ausência e a distância.

Aos amigos da faculdade, pelas discussões sobre o assunto.

Aos grandes amigos Bruno Streb Vieira, Bruno Velozo, Fernando Krueger, George Porto Haeffner, Igor Antonio Schmidt e Markus Bonzanini pela parceria, hoje e sempre.

Aos chefes da Gerdau por possibilitarem horários flexíveis e eventuais faltas para a realização do trabalho.

Aos orientadores Marina Seelig e Paulo Schneider, pelo norte que me deram e pelo conhecimento que compartilharam.

E especialmente à Jo, que me mostrou o que é viver intensamente.

SANTI, A. **Estudo da eficiência da geração de eletricidade a partir de gás natural e resíduos sólidos urbanos**. 2012. 12 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

RESUMO

A correta destinação dos resíduos sólidos urbanos vem se mostrando um problema de cunho mundial. Sabe-se que uma boa destinação para esses resíduos é a incineração em temperaturas controladas, em conjunto com um sistema de limpeza de gases sofisticado. A partir desse tratamento é possível o aproveitamento energético dos resíduos. Este trabalho busca estudar a eficiência de arranjos de geração de energia elétrica combinando geração pela queima de resíduos e geração pela queima de gás natural. Duas configurações foram propostas e simuladas no programa de modelagem termodinâmica Cycle-Tempo, resultando em eficiências de 56,7 e 54,2% o que sinaliza viabilidade técnica para esse tipo de empreendimento.

PALAVRAS-CHAVE: Combinação de ciclos, conversão resíduos-energia, gás natural, simulação termodinâmica

SANTI, A. **Analysis of efficiency of power generation from natural gas and municipal solid waste. 2012.** 12 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2012.

ABSTRACT

The proper disposal of solid waste is a problem of global nature. It is known that a good destination for these wastes is incineration under controlled temperature, in conjunction with a sophisticated gas cleaning. After this treatment, it is possible the energy recovery of waste. This paper aims to study the effectiveness of arrangements to electricity generation by combining generation by burning waste and generation by burning natural gas. Two configurations have been proposed and simulated in thermodynamic modeling program Cycle-time, resulting in efficiencies of 56.7 and 54.2% which indicates the technical feasibility for this type of project.

KEYWORDS: Combination of cycles, waste to energy conversion, natural gas, thermodynamic simulation

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
2. FUNDAMENTAÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	1
2.1. CICLO COMBINADO	1
2.2. CYCLE-TEMPO	3
3. METODOLOGIA	4
3.1 GÁS DE COMBUSTÃO DO QUEIMADOR RSU MISTURADO COM O GÁS DE DESCARGA DA TURBINA A GÁS NATURAL	6
3.2 GERAÇÃO DE VAPOR A PARTIR DOS GASES DE COMBUSTÃO DO RSU	7
3.3 TROCÁ DE CALOR ENTRE OS GASES DE COMBUSTÃO	8
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	9
5. CONCLUSÃO	10
REFERÊNCIAS.....	11

1. INTRODUÇÃO

O gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos vem se mostrando um dos principais desafios em termos ambientais por parte dos governantes e da sociedade em geral. No Brasil, vigora desde 2010 a Política Nacional de Resíduos Sólidos, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos urbanos (RSU), tendo como um de seus objetivos o incentivo ao desenvolvimento de sistemas de gestão ambiental e empresarial voltados para a melhoria dos processos produtivos e ao reaproveitamento dos resíduos sólidos, incluídos a recuperação e o aproveitamento energético [Brasil, 2010]. Ela institui ainda que ao prazo máximo de agosto de 2014 deve ser implantada a seguinte ordem de prioridade na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos no país: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos. Isso quer dizer que está definido que os resíduos não reciclados devem ser tratados e que somente o rejeito desse tratamento deve ser destinado ao aterro sanitário.

A alternativa que tem se mostrado mais acertada no mundo, permitindo a disposição final adequada de um volume reduzido e com pequeno impacto ambiental, é o tratamento térmico do lixo. Temperaturas elevadas associadas a sofisticados sistemas de limpeza dos gases da combustão satisfazem as normas ambientais mais exigentes. O tratamento com recuperação energética pela queima dos resíduos é conhecido como waste-to-energy (WTE, em português resíduos-energia, REN) [WTER, 2012].

Plantas resíduos-energia convencionais queimam o lixo gerando gases quentes, os quais são utilizados para gerar energia elétrica (movimentando uma turbina) ou térmica (para aquecimento de água, por exemplo). Devido ao fato desses gases serem altamente corrosivos, a pressão e a temperatura são limitadas em aproximadamente 400°C e 40 bar, o que resulta em uma baixa eficiência termodinâmica das plantas, em torno de 22% [Ribeiro e Kimberlin, 2010]. O êxito de um projeto de uma planta REN passa pelos dados das quantidades e da qualidade do lixo/combustível que será recebido. Nesse sentido, um grande problema encontrado é o baixo poder calorífico dos resíduos de algumas regiões, devido à grande quantidade de matéria orgânica e umidade. Para que uma usina REN apresente bons resultados em termos de eficiência, a média anual do valor do poder calorífico inferior deve ser de pelo menos 7000 kJ/kg [The World Bank, 1999]. O poder calorífico inferior estimado para o lixo doméstico de Porto Alegre destinado a aterramento é de aproximadamente 5000 kJ/kg [Seelig e Schneider, 2012]. A queima de um outro combustível, como o gás natural, é uma opção para garantia e/ou aumento da eficiência total da planta, através da combinação dos respectivos ciclos.

O objetivo deste trabalho é estudar a eficiência de arranjos de geração de energia elétrica combinando geração pela queima de RSU e geração pela queima de gás natural. Duas configurações são propostas e simuladas no Cycle-Tempo, um programa de modelagem termodinâmica e otimização de sistemas de geração elétrica e térmica.

2. FUNDAMENTAÇÃO E REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Ciclo Combinado

É chamado ciclo combinado a combinação de ciclos de potência, sendo a mais comum a combinação Brayton-Rankine. Nela, o calor liberado pelo ciclo Brayton é utilizado parcial ou totalmente como entrada no ciclo Rankine. Na geração de eletricidade essa combinação é conveniente, pois os gases de exaustão da turbina a gás (ciclo Brayton) estão a temperaturas próximas de 500°C, o que permite seu emprego na geração de vapor para alimentar uma turbina a vapor (ciclo Rankine) [Kalatalo, 2004]. Essas turbinas operando isoladamente apresentam eficiência térmica abaixo de 40%, com a maior parte do calor perdido nos gases de

exaustão. Com o aproveitamento dos gases de exaustão da turbina a gás em uma turbina a vapor, a eficiência térmica da combinação pode ultrapassar 50% [GasNet, 2007; Leão, 2012].

Um exemplo de usina REN em ciclo combinado com gás natural é a usina de Bizkaia, em Bilbao, Espanha [Comissão Europeia, 2005; Cortés, 2009]. Ela atende cerca de 100 municípios, num total aproximado de 650 mil habitantes, produzindo cerca de 30% de toda a energia elétrica residencial da localidade. A usina foi construída com o objetivo de aumentar a disponibilidade de energia elétrica com alta eficiência na recuperação dos RSU, paralelamente com baixo impacto ambiental. A planta conta com uma turbina a gás natural com capacidade de geração de 43 MW e uma turbina a vapor com capacidade de 56,5 MW. Sua eficiência é de 44%. Aproximadamente 33 toneladas de RSU são incineradas a cada hora, com poder calorífico inferior em torno de 8000 kJ/kg. No entanto o consumo de gás natural é alto, sendo responsável por aproximadamente 75% da energia gerada.

Poma *et al.* [2009] projetaram e simularam um sistema integrado de geração de energia através de gás natural e resíduos sólidos, o qual consideraram uma futura opção da utilização termelétrica do lixo do norte da Itália. Segundo os autores, a planta produziria algo em torno de 160 MW em energia elétrica e 50 MW em calor, que poderia ser distribuído em uma rede. Esse tipo de planta combinada apresenta rendimentos muito superiores a plantas não integradas, podendo apresentar eficiência de 46% (como visto da usina de Bizkaia). O modelo adotado foi o de compartilhar o vapor entre o ciclo a resíduos e o ciclo a gás natural, com os gases de combustão de cada ciclo dirigidos para tratamento. Os autores destacam que as principais vantagens deste ciclo combinado seriam a eliminação do superaquecedor no ciclo a resíduos, diminuindo custos, a redução da irreversibilidade através da formação de vapor saturado no ciclo a resíduos, a utilização de apenas uma turbina para os dois ciclos (maior e, portanto, mais eficiente), além da redução do impacto ambiental dos gases provenientes da combustão e diminuição de custos no sistema de controle da usina. Os resultados apontaram bons valores de rendimentos termodinâmicos, tanto para a produção de energia elétrica ou elétrica e térmica.

Ribeiro e Kimberlin [2010] propuseram o conceito do Ciclo Combinado Otimizado (CCO), o qual reduziria a proporção necessária de gás natural em usinas que utilizem esse combustível juntamente com RSU para geração de energia e evitaria corrosão nas caldeiras a vapor causada pelas altas temperaturas associadas aos ácidos corrosivos presentes nos gases da combustão dos resíduos. O CCO combina turbinas a gás natural com turbinas a vapor, vapor gerado em caldeiras de recuperação tanto pelos gases resultantes da combustão do RSU quanto pelos gases de escape da turbina a gás. Algumas das principais qualidades do ciclo proposto são: a introdução de trocadores de calor de condensação para capturar o calor de baixa temperatura dos gases de combustão da caldeira; altas temperaturas de vapor alcançadas nos superaquecedores externos utilizando gases limpos provenientes da exaustão da turbina a gás; possibilidade de utilização dos resíduos com alto teor de umidade, mesmo para pequenos queimadores utilizando paredes refratárias; preaquecimento do ar de combustão para queima do RSU objetivando redução da formação de NOx; e a vaporização antecipada do conteúdo de água presente nos resíduos. Dessa forma, a eficiência deste tipo de ciclo poderia chegar a 33% para a parte de queima de resíduos e aproximadamente 50% para o sistema a gás natural, sendo que o consumo de gás poderia ainda ser substituído por gases provenientes de aterros sanitários, etanol ou biodiesel. Os autores compararam duas situações de plantas REN por simulação no programa GateCycle: uma reproduz a usina de Bizkaia, utilizando cerca de 75% de gás natural para geração de energia, e a outra reproduz um CCO. As simulações demonstraram que o CCO tem maior eficiência na parte da queima dos RSU em relação ao ciclo convencional (cerca de 10% maior) e que o consumo de gás é reduzido em sete vezes. Os resultados para emissões demonstraram uma diminuição de cerca de 34% na emissão de CO₂, sendo que a utilização de outros combustíveis que não o gás natural poderiam aumentar esse valor para 65%. Os autores ressaltam a possibilidade da implantação de plantas que utilizem este ciclo, contribuindo para a diminuição do aquecimento global.

2.2. Cycle-Tempo

O Cycle-Tempo é um programa de modelagem termodinâmica e otimização de sistemas de geração elétrica e térmica. Foi concebido pela Universidade Técnica de Delft nos Países Baixos e é distribuído pela empresa Asimptote, tendo licença gratuita para fins educacionais. Foi desenvolvido para ser uma moderna ferramenta de análise termodinâmica e de otimização de sistemas energéticos. Sistemas energéticos são constituídos por ciclos interligados, que por sua vez possuem muitos componentes (válvulas, trocadores de calor, bombas, turbinas, caldeiras ou até mesmo dispositivos mais complexos como células de combustíveis e gaseificadores). Todos esses componentes e equipamentos são interligados entre si por tubulações, resultando numa complexa rede de fluxos de massa e energia. A principal característica do Cycle-Tempo é o cálculo dos fluxos de massa e energia mais relevantes no sistema. Possui interface totalmente gráfica: a configuração do sistema pode ser montada como um diagrama de fluxo, o que permite ao usuário personalizar os modelos e configurar o sistema da maneira que desejar. A entrada de dados pode ser feita através de caixas de diálogo, e os resultados são apresentados em gráficos e tabelas [Delft University of Technology, 2012].

Segundo Rodrigues [2005], além da excelente interface gráfica, o programa é recomendado para simulações em regime permanente tanto para plantas de geração de potência quanto para ciclos de refrigeração. O método de solução das equações é um híbrido entre métodos simultâneos e sequenciais, de maneira que as equações do balanço linear são resolvidas simultaneamente, enquanto as equações constitutivas dos componentes são formuladas explicitamente em uma incógnita e calculadas em uma rotina interna para cada rotina externa das equações do balanço. A seguir são apresentados alguns trabalhos envolvendo ciclos de geração de energia que utilizaram o Cycle-Tempo em suas simulações.

- Kalina [2009] estudou a possibilidade de acoplamentos de cogeração de energia a partir de biomassa com plantas movidas a carvão mineral para geração de energia térmica. A motivação do estudo partiu do fato que a biomassa tem potencial de redução de emissão de CO₂ e consumo de combustíveis fósseis na geração de energia, sem desatentar ao fato de que a implementação desse tipo de geração depende diretamente de interesses políticos, econômicos e técnicos. Obviamente, os melhores resultados podem ser obtidos se a melhor escolha do ponto de vista técnico for obtida. Quatro tipos de arranjos de ciclos foram propostos e modelados no Cycle-Tempo. Um balanço anual de massa e energia foi calculado, juntamente com uma análise econômica. Os resultados indicaram uma geração de energia satisfatória e redução nas emissões. A melhor solução técnica para a montagem da central de aquecimento analisada foi o de ciclo combinado integrado, sendo um ciclo de gaseificação de biomassa e um ciclo a vapor.
- Rosyid *et al.* [2010] analisaram um ciclo de geração de potência a vapor binário (SPP-BCP, Steam Power Plant - Binary Cycle Plant), onde o calor de baixa temperatura rejeitado por um sistema a vapor convencional pode ser eficientemente utilizado para gerar eletricidade. Esse tipo de planta opera com dois fluidos de trabalho, como por exemplo água e n-pentano. Resultados de cálculos anteriores de ciclos binários em plantas de geração de potência a vapor com n-pentano indicaram um aumento da eficiência da planta em torno de 9% em relação à planta a vapor apenas. O objetivo do trabalho foi analisar a sensibilidade do desempenho do ciclo binário frente a variações de capacidade operacional e da variação da temperatura da água dos condensadores. Foi variada a capacidade do ciclo a vapor em 25, 50, 75 e 100%, a pressão de entrada na turbina de 5 para 30 bar e a temperatura de entrada na turbina de 125 a 37°C. Os resultados indicaram que o desempenho do ciclo a vapor diminuiu pouco com a variação de qualquer um dos itens citados acima.

- Vera *et al.* [2011] analisaram a possibilidade da utilização de resíduos gerados na produção de azeite de oliva para geração de energia. São diversos os resíduos, como pedaços de madeira, folhas, bagaço e o próprio caroço da azeitona, os quais tem um poder calorífico inferior de 16300 kJ/kg, valor obtido através de testes. O principal objetivo do trabalho foi comparar a desempenho de duas pequenas plantas CHP (Combined Heat and Power, ou geração combinada de energia térmica e elétrica): gaseificação + turbina a gás e turbina a gás com queimador externo. Para comparação foram calculados vários parâmetros no Cycle-Tempo, como eficiência elétrica e global, consumo de biomassa e eficiência exergética. Os resultados das simulações mostraram que as eficiências elétrica e global no sistema com queimador externo (19,1% e 59,3%) foram significativamente maiores do que no sistema com gaseificação (12,3% e 45,4%).

3. METODOLOGIA

O objetivo deste trabalho é estudar a eficiência de arranjos de geração de energia elétrica combinando geração pela queima de RSU e geração pela queima de gás natural. Duas configurações são propostas e simuladas no Cycle-Tempo para obtenção de suas eficiências. Cada arranjo é composto por três partes mostradas na Figura 3.1 e apresentadas a seguir: um queimador de resíduos, um ciclo Brayton e um ciclo Rankine.

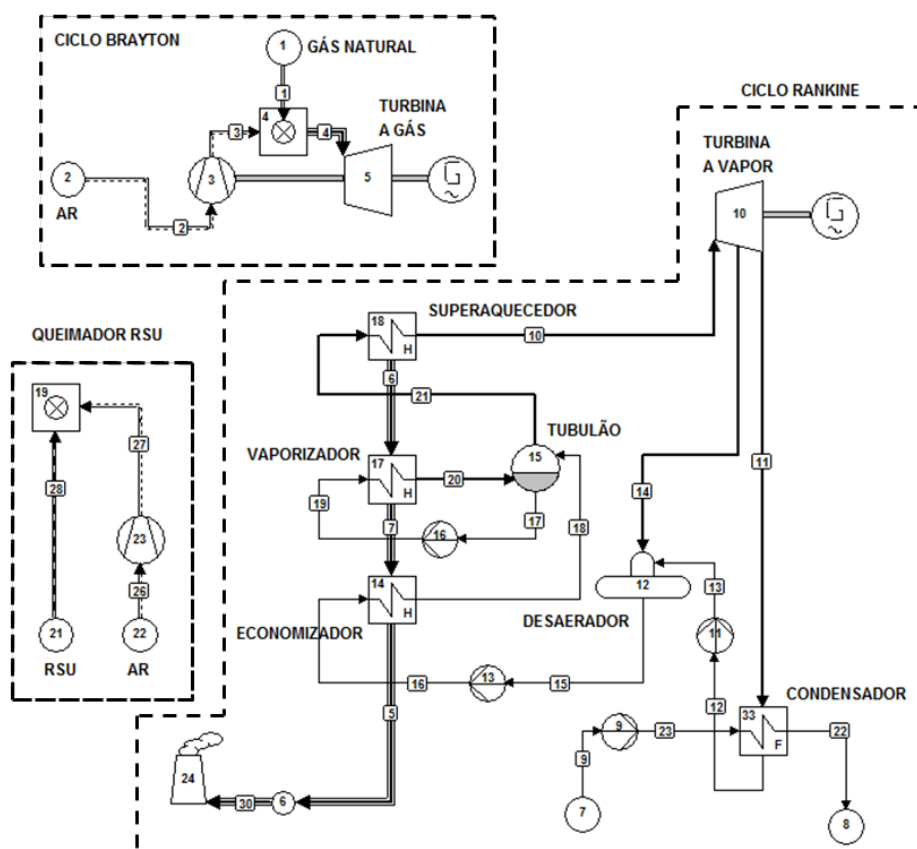


Figura 3.1: Partes dos arranjos de geração de energia elétrica combinando geração pela queima de RSU e geração pela queima de gás natural

Queimador RSU: No queimador de resíduos é admitido lixo a uma taxa de 2 kg/s e ar, ambos em temperatura e pressão ambiente. Esta vazão mássica de lixo corresponde a aproximadamente 170 t/dia e é tecnicamente aplicável segundo Ribeiro e Kimberlin [2010]. Segundo Lopes [2010], devido às variações do poder calorífico dos RSU, de forma a garantir uma combustão completa, é necessário efetuar a queima com uma taxa de ar de 40% a 100% superior à das condições estequiométricas, variando segundo o tipo de RSU e o tipo de incinerador. O ar passa por um compressor e em seguida segue para o combustor, onde ocorre a queima dos resíduos em temperaturas de 1100°C, com os gases de exaustão a 1000°C. Estes dados de temperatura foram adotados seguindo Levy e Cabeças [2006], os quais afirmam que a temperatura de queima não deve ser inferior a 850°C para evitar as emissões de odores e que uma temperatura superior a 980°C permite minimizar as emissões de dioxinas, furanos e outras partículas orgânicas. Foi assumido o poder calorífico inferior estimado para o lixo doméstico de Porto Alegre destinado a aterramento, aproximadamente 5000 kJ/kg [Seelig e Schneider, 2012]. A Tabela 3.1 traz os parâmetros de entrada.

Tabela 3.1: Parâmetros de entrada do queimador RSU

Parâmetro	Valor
Vazão mássica de entrada de ar no combustor, $\dot{m}_{ar,RSU}$	26 kg/s
Vazão mássica de entrada de RSU no combustor, $\dot{m}_{RSU,RSU}$	2 kg/s
Razão ar/combustível, λ	1,61
Temperatura de admissão do ar, $T_{ar,RSU}$	25°C
Pressão de admissão do ar, $P_{ar,RSU}$	1.01 bar
Poder calorífico inferior do RSU, PCI_{RSU}	5000 kJ/kg

Uma questão importante na queima de resíduos são os gases resultantes. O sistema de tratamento dos gases da queima dos resíduos representa no mínimo metade do custo de investimento inicial para implantação de uma usina REN e parcela substancial do custo de operação, parte associada ao consumo de energia [Baxter, 2007]. Não há um padrão para a composição do sistema, ele deve ter equipamentos que lidem com remoção de particulados, ácidos, metais, dioxinas, furanos e NOx. Kropáč *et al.* [2012] estimaram valores de consumo de energia entre 90 e 155 kWh por tonelada de resíduo queimado, analisando o sistema de uma usina REN composto por precipitador eletrostático, filtro catalítico e lavador de gases. Aqui foi assumido um valor médio de consumo de energia do sistema de tratamento de gases de 122,5 kWh/t.

Ciclo Brayton: O ciclo Brayton é composto por um compressor, um queimador de gases, uma turbina a gás e um gerador elétrico. Ar é admitido no compressor, comprimido e injetado no combustor que recebe o combustível gás natural (PCI 38000 kJ/kg) e a queima ocorre a uma temperatura de 1100°C. A seguir os gases provenientes da combustão são expandidos numa turbina a gás (eficiência isentrópica de 85%, seguindo os valores propostos por Silva [2010]) que está acoplada ao gerador elétrico, onde é gerada uma potência fixa de 40 MW. Dessa forma, as vazões mássicas de entrada de ar e combustível são calculadas a partir dessa potência previamente estabelecida. Os gases de saída da turbina se encontram a uma temperatura fixada de 530°. Esses dados foram retirados de exemplos do programa Cycle-Tempo. A Tabela 3.2 traz os parâmetros de entrada.

Tabela 3.2: Parâmetros de entrada do ciclo Brayton

Parâmetro	Valor
Potência útil gerada	40 MW
Eficiência isentrópica da turbina, $\eta_{I,brayton}$	85%
Temperatura de saída dos gases	530°C
Razão de mistura, λ	2,14
Temperatura de admissão do ar, $T_{ar,brayton}$	25°C
Pressão de admissão do ar, $P_{ar,brayton}$	1.01 bar
Poder calorífico inferior do gás natural, PCI_{GN}	38000 kJ/kg

Ciclo Rankine: O ciclo Rankine possui um número maior de equipamentos e tem como fonte de alimentação apenas os gases de combustão da turbina a gás e do queimador RSU. Pode-se dizer, portanto, que é um ciclo que não gera potência isolado, dependendo do funcionamento das outras partes. O ciclo Rankine será explicado posteriormente, já que sua configuração depende diretamente do tipo de acoplamento configurado.

A seguir são apresentadas as diferentes configurações propostas de geração de energia elétrica combinando geração pela queima de RSU e geração pela queima de gás natural. São descritos a ligação entre os equipamentos, os tipos de fluidos envolvidos e alguns parâmetros de entrada e/ou saída (temperaturas, pressões, etc.).

3.1 Gás de combustão do queimador RSU misturado com o gás de descarga da turbina a gás natural

A primeira configuração proposta é a mistura dos gases de combustão do queimador RSU e da turbina a gás para posterior recuperação do calor em uma caldeira. A mistura dos gases ocorre através de um nó na tubulação, onde se encontram as correntes de gás quente provenientes do queimador RSU e da turbina a gás. Em seguida os gases são direcionados à caldeira, composta de um superaquecedor, um evaporador e um condensador, responsáveis por realizar a troca de calor entre o gás quente e o fluido de trabalho (água ou vapor d'água).

O ciclo Rankine funciona da seguinte maneira, sequencialmente: vapor é gerado no superaquecedor e, em seguida, é expandido em uma turbina, que tem duas purgas. A primeira retira vapor e o direciona para um desaerador, que é responsável por eliminar gases que tenham sido dissolvidos na água ao longo do processo, antes que o fluido chegue à caldeira. A segunda purga retira vapor a uma pressão inferior em relação à primeira purga, vapor que é resfriado e condensado em um condensador, trocando calor com um sistema secundário de água de arrefecimento composto por dois reservatórios e uma bomba. Após a condensação do vapor, o fluido segue para o desaerador, onde juntamente com o vapor da primeira purga sofre a retirada dos gases do processo. Após a passagem pelo desaerador, água líquida é bombeada (60 bar) e passa pelo economizador, onde aumenta sua temperatura e, posteriormente, chega ao tubulão, onde vapor e líquido saturado coexistem num mesmo volume de controle. Do tubulão saem duas correntes de fluido: uma canalização com água saturada, que é novamente aquecida no evaporador e retorna em forma de vapor, e uma com vapor saturado, que vai em direção ao superaquecedor. O vapor é superaquecido e segue para a turbina ($\eta_{I,rankine} = 85\%$), onde é expandido e segue para as purgas, reiniciando o ciclo. Um esquema que ilustra o acoplamento da mistura dos gases de combustão do RSU e da turbina a gás é apresentado na Figura 3.2.

O grande inconveniente da passagem dos gases provenientes da queima do RSU por toda a caldeira de recuperação de calor é que eles são corrosivos, o que acelera a degradação dos equipamentos e, por consequência, aumenta a necessidade de manutenção. Investimento na limpeza desses gases deve ser feito.

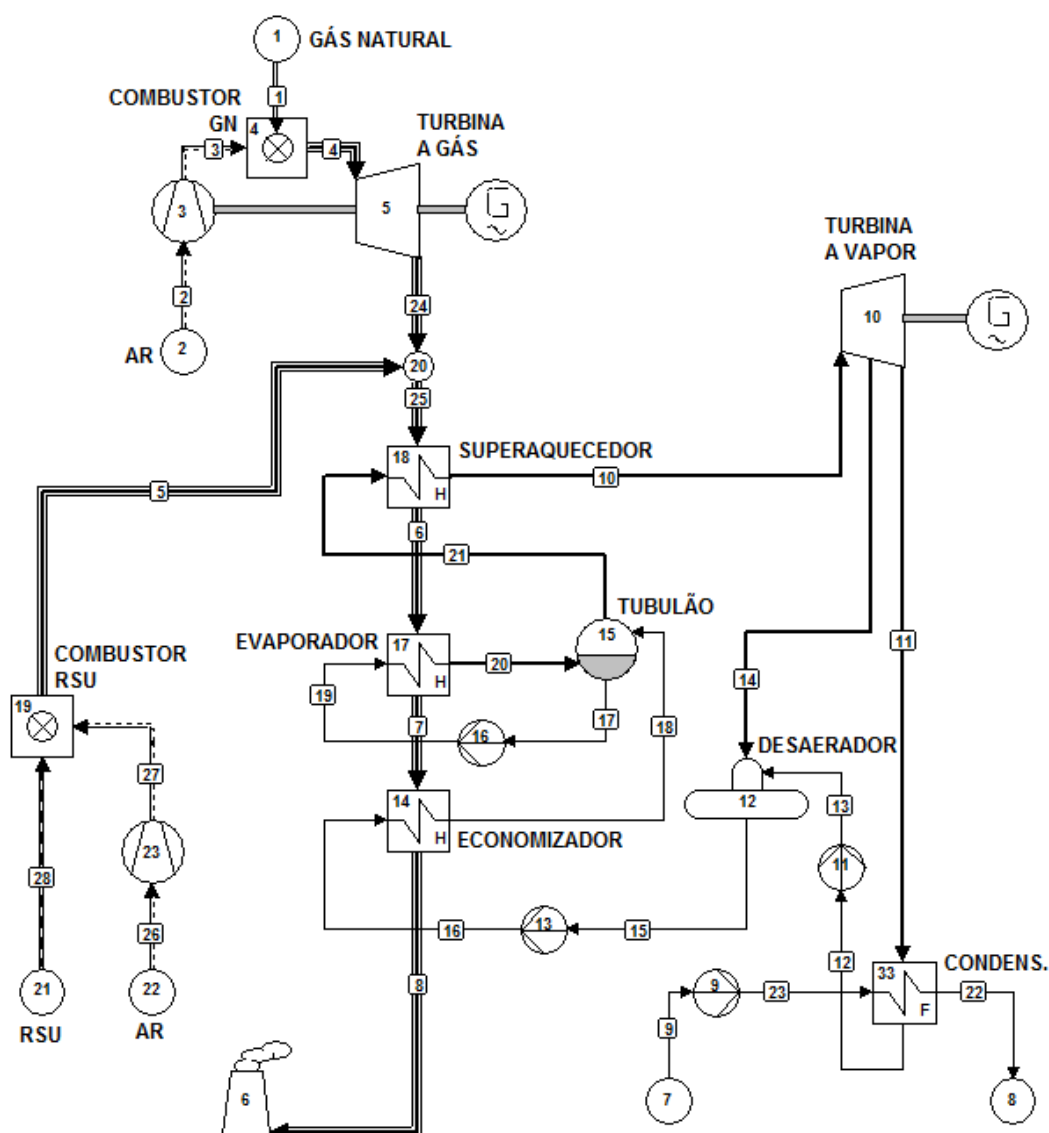


Figura 3.2: Configuração com mistura dos gases de combustão do queimador RSU e da turbina a gás para posterior recuperação do calor em uma caldeira

3.2 Geração de vapor a partir dos gases de combustão do RSU

A segunda configuração proposta é a utilização do gás de queima do RSU para gerar vapor em uma caldeira separada, injetando-o posteriormente no ciclo Rankine. O ciclo da turbina a gás segue inalterado, sendo que os gases de combustão da turbina a gás trocam calor com os fluidos do ciclo Rankine na caldeira de recuperação.

O funcionamento deste arranjo se dá da seguinte forma: após a bomba principal há um nó que divide a corrente de água em duas. Uma corrente segue para o economizador do ciclo Rankine, onde será aquecida e segue para o tubulão. A outra corrente é guiada para um trocador de calor que é responsável por vaporizar a água, utilizando para isso a energia térmica proveniente da queima dos RSU. A queima ocorre da mesma maneira que na primeira configuração. Após a geração do vapor no trocador de calor, o mesmo é direcionado para o tubulão. A partir daí segue o fluxo normal do ciclo Rankine, que é a passagem pelo superaquecedor e posterior expansão na turbina ($\eta_{I,rankine} = 85\%$). Os gases da queima do

RSU que passaram pelo trocador de calor são destinados a tratamento e posterior exaustão. Um esquema ilustrativo do funcionamento é apresentado na Figura 3.3.

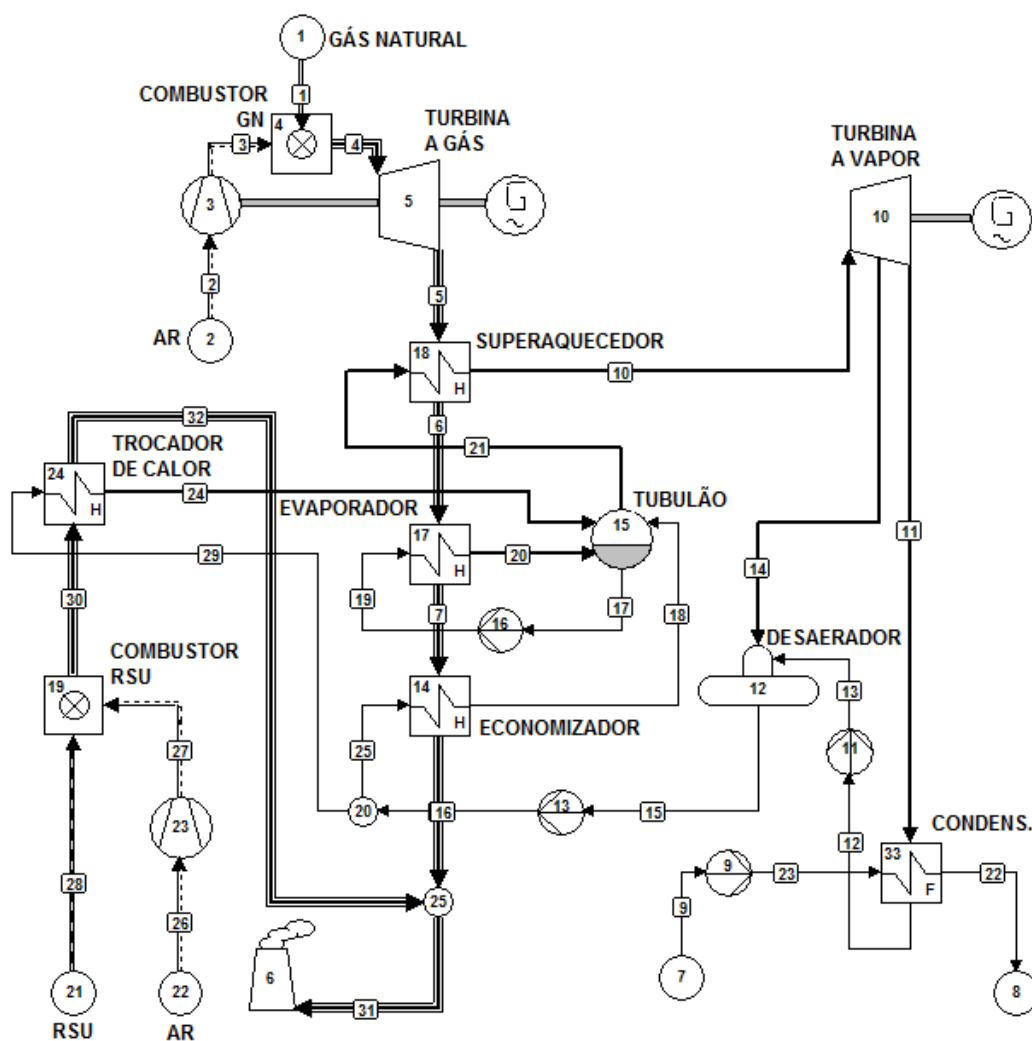


Figura 3.3: Configuração com utilização do gás de queima do RSU para gerar vapor em uma caldeira separada, injetando-o posteriormente no ciclo Rankine

3.3 Troca de calor entre os gases de combustão

Uma terceira opção de configuração seria a troca de calor entre os gases de combustão do RSU e da exaustão da turbina a gás. Na Figura 3.4 uma simplificação do ciclo pode ser observada. Considerando que os gases saem da turbina a gás natural a uma temperatura de 530° e os gases da exaustão do queimador RSU saem a uma temperatura de 1000°C , a troca de calor num trocador gás-gás poderia aumentar consideravelmente a temperatura do gás da turbina, porém os gases do RSU ainda seriam descartados ao ambiente com temperatura muito elevada, ou seja, seria energia descartada. A opção da instalação de mais trocadores de calor em série para uso da energia contida nos gases do RSU sofreria do problema da corrosão nesses equipamentos. Concluiu-se então que essa configuração é deficiente do ponto de vista energético, visto que não seria viável um grande aproveitamento do calor contido nos gases de combustão do RSU, portanto ela não foi simulada.

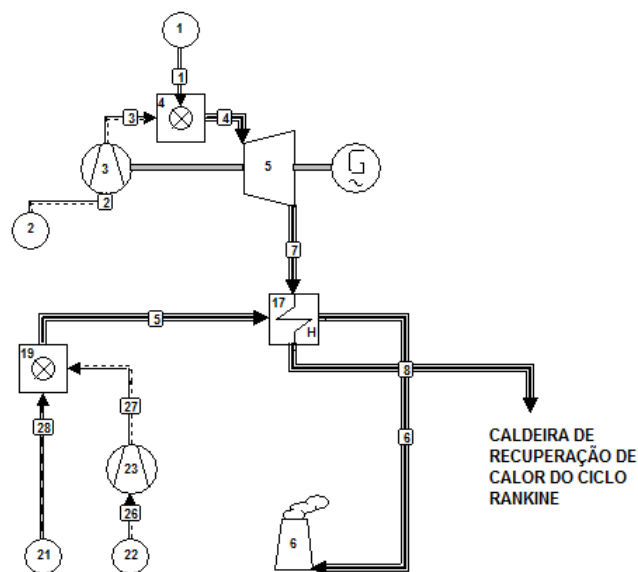


Figura 3.4: Modelo simplificado da configuração com troca de calor entre os gases de combustão

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4.1 traz os resultados da simulação no Cycle-Tempo das duas configurações propostas. O objetivo é avaliar a eficiência dos arranjos de geração de energia elétrica combinando geração pela queima de RSU e geração pela queima de gás natural.

Tabela 4.1: Resultados da simulação no Cycle-Tempo

Configuração		Potência [kW]		Diferença [%]
		(1)	(2)	
Potência entregue	Gás natural	95238	95238	0
	RSU	10000	10000	0
Geração de potência	Turbina a gás	40000	40000	0
	Turbina a vapor	20332	17668	15
Consumo	Bombas e compressores	675,6	587	15
Eficiência líquida [%]	-	56,7	54,2	4,6

A primeira parte da tabela traz informações sobre a potência entregue ao ciclo, ou seja, a potência consumida em combustível. Já que o queimador RSU está ajustado para entregar uma temperatura de saída fixa de 1000°C e a turbina a gás está ajustada para entregar uma potência definida de 40 MW e temperatura de saída de 530°C em ambas as configurações, era esperado que os valores em relação aos combustíveis fossem os mesmos.

A geração de potência se dá em duas turbinas. Como citado anteriormente, a turbina a gás natural é ajustada para produzir 40 MW. Já a turbina a vapor é totalmente dependente do comportamento global do ciclo, de maneira que sua geração está ligada a quanto de energia

proveniente de gás natural e RSU pode ser repassada ao ciclo Rankine. Dessa forma, nota-se um melhor desempenho na configuração (1), com geração 15% superior à configuração (2), o que se deve principalmente ao fato da maior recuperação do calor dos gases que passam pela caldeira em (1).

Sobre as eficiências, obteve-se uma diferença de 4,6% entre as configurações. Essa diferença está ligada ao mesmo fator citado anteriormente: a recuperação do calor dos gases de queima. Para comparação, os gases de queima de (1) chegam à chaminé a uma temperatura de 159°C, enquanto em (2) essa temperatura é de aproximadamente 250°C. Considerando o valor de eficiência de 46% para o sistema integrado de geração de energia através de gás natural e resíduos sólidos proposto por Poma *et al.* [2009], os valores encontrados foram consideravelmente superiores, 56,7% em (1) e 54,2% em (2). Porém eles não consideram o consumo de energia do sistema de tratamento dos gases do queimador RSU. Considerando um consumo de 122,5 kWh/t para a limpeza e uma admissão de 7,2t/h de lixo, chega-se a uma potência consumida de 882kW. Considerando esta potência como consumo, pode-se recalcular as eficiências dos sistemas, que caem em torno de 1%, como mostrado na Tabela 4.2. As eficiências resultantes estão próximas dos valores teóricos para ciclos combinados, de acima de 50%.

Tabela 4.2: Comparação dos resultados com e sem o consumo de energia do tratamento de gases

	Potência [kW]	
Sem tratamento	20332	17668
Eficiência	56,7%	54,2%
Com tratamento	19450	16786
Eficiência	55,8%	53,4%

O conceito do Ciclo Combinado Otimizado proposto por Ribeiro e Kimberlin [2010] destaca que seria interessante em arranjos de geração de energia elétrica combinando geração pela queima de RSU e geração pela queima de gás natural que a maior parte da geração fosse proveniente dos resíduos. Nas configurações propostas, aproximadamente 10% da energia vem dos resíduos. Apesar da maior parte da eletricidade do arranjo proposto vir da queima de gás natural e não do tratamento dos resíduos, os resultados são interessantes, pois as simulações mostraram viabilidade técnica com eficiências compatíveis com as de referência para ciclo combinado. Além do mais, no caso usinas que receberão como combustível resíduos com baixo poder calorífico, tal como o lixo doméstico de Porto Alegre destinado a aterramento, a queima de um outro combustível, como o gás natural, é uma opção para garantia e/ou aumento da eficiência total da planta. Esse outro combustível viabilizaria a recuperação energética do lixo. Resta, entretanto, analisar a viabilidade econômica desse tipo de arranjo.

5. CONCLUSÃO

O principal objetivo deste trabalho foi simular computacionalmente arranjos de geração de energia elétrica combinando geração pela queima de resíduos sólidos urbanos e geração pela queima de gás natural. A partir das simulações, foram obtidas as eficiências de cada arranjo, bem como as potências produzidas e consumidas. Neste quesito, a utilização de RSU para queima e geração de energia elétrica se mostrou uma alternativa tecnicamente viável, tanto que é utilizada em países de primeiro mundo a muitos anos.

Paralelamente a isso, o software Cycle-Tempo se mostrou uma boa ferramenta para avaliação dos arranjos. Após a construção dos ciclos com a implementação dos equipamentos e a interligação entre os mesmos através de canalizações, a setagem dos fuidos de trabalho e a definição das variáveis de entrada, o software possibilitou a análise dos arranjos através da

fácil alteração de parâmetros e o cálculo praticamente instantâneo. Entretanto, o programa também apresentou algumas dificuldades, como por exemplo a imposição de uma razão de mistura ar/combustível como parâmetro de entrada. Como não foi possível setar esta variável, foram definidas a vazão de entrada de combustível e de ar, de modo a obter uma razão de mistura calculada pelo software que fosse condizente com as referências utilizadas.

Nas configurações propostas, aproximadamente 10% da energia veio dos resíduos. Apesar da maior parte da eletricidade do arranjo proposto vir da queima de gás natural e não do tratamento dos resíduos, os resultados são interessantes, pois as simulações mostraram viabilidade técnica com eficiências compatíveis com as de referência para ciclo combinado. Se por um lado isso traz uma alta eficiência para a planta, por outro lado contribui negativamente para o aquecimento global, pois representa a queima de um combustível fóssil. Porém, este combustível viabilizaria a recuperação energética do lixo.

Sugere-se para trabalhos futuros adicionar aos ciclos de geração de potência equipamentos que simulem o tratamento dos gases da queima dos resíduos, tornando a simulação mais realista. Poderia também ser proposto um ciclo termodinâmico mais complexo, com regeneração do calor, aumentando assim a eficiência de segunda lei. Outra opção seria simular o CCO sugerido por Ribeiro e Kimberlin [2010], no qual, segundo os autores, a queima de resíduos é responsável pela geração da maioria da energia elétrica da planta, cerca de 75%.

REFERÊNCIAS

Baxter, D. Factors affecting energy efficiency of waste to energy plants. **Energy Materials**, Vol. 2, pp. 166–174, 2007.

Brasil. **LEI Nº 12.305, Política Nacional dos Resíduos Sólidos**, http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm.

Cortés, S. **Planta de valorización energética de RSU de Bizkaia Zabalgarbi**. Retos de futuro. Las nueva s tecnologías para el tratamiento de residuos. Sabadell, 2009.

Delft University Of Tecnology. **Cycle-Tempo operation**. Guia para uso do programa, 2012.

GasNet. **Ciclo Combinado**.2007 http://www.gasnet.com.br/novo_termeletricas/ciclo.asp

Kalina, J. **Retrofitting of municipal coal fired heating plant with integrated biomass gasification gas turbine based cogeneration block**. Silesian University of Technology, Gliwice, 2009.

Kalatalo, D. N. **Análise exergética de ciclos combinados**. Universidade de Brasília. Brasília, 2004.

Kropáč, J., Bébar, L., Pavlas M. Industrial and hazardous waste combustion and energy production. **Chemical Engineering Transactions**, Vol. 29, pp. 673–678, 2012.

Leão, R. P. S. **Tecnologias de Geração de Energia Elétrica: Geração Termoelétrica**. Universidade Federal do Ceará, 2012.

Levy, J. Q., Cabeças, A. J. **Resíduos Sólidos Urbanos – Princípios e Processos**. AEPISA – Associação das Empresas Portuguesas para o Sector do Ambiente, 1ª Edição, 2006.

Lopes, M. **Reciclagem de escórias de incineração de RSU como agregados para a construção**. Universidade de Aveiro, 2010.

Poma, C. Verda, V. Consonni, S. **Design and performance evaluation of a waste-to-energy plant integrated with a combined cycle.** Department of Energy Engineering, Politecnico di Torino. Torino, 2009.

Ribeiro, S. B. G. **Usinas termelétricas a resíduos sólidos urbanos (lixo) e gas natural de alta eficiência.** Patente de Invenção, Rio de Janeiro, 2012.

Ribeiro, S. V .G. Kimberlin, T. **High efficiency waste to energy power plants combining municipal solid waste and natural gas or ethanol.** Orlando, 2010.

Rodrigues, F. R. **Simulador em regime permanente de alguns equipamentos de um ciclo Rankine regenerativo.** Tese de Mestrado. Porto Alegre, 2005.

Rosyd, H., Koestoer, R., Putra, N., Nasruddin. Mohamad, A. A. Yanuar. **Sensitive analysis of steam power-binary cycle.** The University of Calgary, Calgary, 2010.

Seelig, M., Schneider, P. **Estimating the energy content of municipal solid waste from its physical composition: the heat of combustion of Porto Alegre's household solid waste.** 14th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering. Rio de Janeiro, 2012.

Silva, M. D. V. **Avaliação da viabilidade de implementação de ciclo combinado em uma usina termelétrica.** Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2010.

The World Bank. **Decision Markers` Guide to Municipal Solid Waste Incineration.** Washington DC, 1999.

WTERT Brasil. **Geração de energia elétrica com resíduos sólidos urbanos - usinas "waste-to-energy" (WTE),** Rio de Janeiro, 2012.