

## **XI-027 – POTENCIAL ENERGÉTICO DO PROCESSO DE PIRÓLISE APLICADO AO TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS EM DIFERENTES CONFIGURAÇÕES**

**Artur Tôrres Filho<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Agrônomo pela UFV. Especialista em Engenharia Sanitária e Ambiental/Engenheiro de Segurança do Trabalho pela UFMG. Mestre e Doutorando em Meio Ambiente, Saneamento e Recursos Hídricos pela UFMG. Diretor técnico da empresa Engenho Nove Engenharia Ambiental Ltda.

**Gilberto Caldeira Bandeira de Melo**

Engenheiro Químico pela UFMG. Mestre em Engenharia Sanitária e Ambiental pela UFMG. Doutor em Ciências de Engenharia (Dr.-Ing.) pela Universidade de Karlsruhe, Alemanha. Professor associado ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA-UFMG).

**Liséte Celina Lange**

Química pela UFPR. Mestre e Doutora em Tecnologia Ambiental pela Universidade de Londres, Inglaterra. Pós Doutorado em Controle da Poluição pela UFMG. Professora associada ao Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (DESA-UFMG).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Antônio Carlos, 6627, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Bloco 1, 4º andar – Pampulha – Belo Horizonte – Minas Gerais – CEP: 30.270-901 – Brasil – Tel: +55 (31) 3409-1934 – Fax: +55 (31) 3409-1879 - e-mail: [artur@engenho9.com.br](mailto:artur@engenho9.com.br)

### **RESUMO**

O tratamento por pirólise caracteriza-se pela degradação térmica de resíduos em uma atmosfera com ausência ou deficiência de oxigênio. Buscando soluções tecnicamente viáveis e ambientalmente seguras para o tratamento de resíduos sólidos urbanos, foi desenvolvido um processo pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, em parceria com instituições cotitulares, denominado “pyrolix”. Neste processo é feita a pirólise por aquecimento indireto dos resíduos em um reator operado em bateladas. No presente trabalho descreve-se proposta a avaliação do potencial de geração de energia elétrica no tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU), em três diferentes configurações de plantas de pirólise, com capacidade para tratar resíduos de áreas urbanas com população atendida de 15, 30 e 50 mil habitantes respectivamente. Em cada configuração desenvolvida, foi avaliado o potencial de geração de energia elétrica do processo aplicado ao tratamento de RSU de duas formas distintas: A partir do calor gerado no processo utilizando o ciclo orgânico de Rankine, bem como através do encaminhamento do produto carbonizado a uma central termoeletrica, para ser utilizado em substituição aos combustíveis tradicionais. Nas duas primeiras configurações, em função do encaminhamento do RUC para centrais termoeletricas externas à planta, considerando-se as eficiências usuais de 30% nessas instalações, pode-se estimar uma taxa de 17,0We por habitante, em relação à capacidade instalada das usinas térmicas. Na terceira configuração, com o consumo de todo o RUC na própria planta de pirólise para geração de energia elétrica em um módulo ORC, com eficiência adotada de 12%, a taxa de geração de energia elétrica foi estimada em 6,4We por habitante.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos Sólidos Urbanos, Pirólise, tratamento térmico de resíduos, cogeração.

### **INTRODUÇÃO**

A evolução da sociedade moderna é caracterizada por uma dependência e limitação cada vez maiores em relação às formas de geração de energia em diversas formas (elétrica, combustíveis, etc). O acesso ao suprimento energético é base fundamental das necessidades humanas e essencial à satisfação da qualidade de vida mínima. A diversificação e descentralização da matriz energética tem se tornado um caminho a ser seguido na busca pelo acesso universal e substituição dos combustíveis e fontes tradicionais, visando minimizar impactos ambientais e climáticos. Neste aspecto, uma alternativa intensamente estudada em todo o mundo é a instalação de sistemas de tratamento de resíduos sólidos integrados a unidades de geração de energia elétrica, via incineração por exemplo, bem como unidades de produção e distribuição/consumo de combustíveis derivados de resíduos (“RDF - refuse derived fuels”).

A pirólise, como processo térmico de tratamento promove a decomposição de resíduos em atmosfera deficiente de oxigênio molecular, tem se tornado objeto de estudos na busca por soluções que diminuam impactos ocasionados pela disposição ou tratamento de resíduos usando processos de maior potencial de geração de poluentes, tal como os incineradores.

No processo pirolítico, o resíduo tratado pode ser convertido em 3 grupos de subprodutos (AIRES *et al.*, 2003): os gases combustíveis, os sólidos carbonizados e os licres pirolenhosos. Wiggers (2003) cita que a pirólise, uma das muitas alternativas de processos de conversão química de resíduos sólidos, tem recebido uma atenção especial pelas suas vantagens ambientais. Sofrendo aquecimento em uma atmosfera empobrecida de oxigênio, as substâncias orgânicas de cadeia longa, os polímeros de origem biológica ou sintéticos, fracionam-se via craqueamento térmico e reações de condensação, gerando produtos finais na forma de frações gasosas e líquidas de menor peso molecular e o resíduo sólido final carbonizado, todos com potencial valor econômico. O processo tem sido testado em um número incontável de plantas piloto e alguns sistemas em escala industrial já são operados em escala plena.

Ao contrário da incineração, que é altamente exotérmica, a pirólise constitui-se de um processo inicialmente endotérmico, ocorrendo numa faixa de temperatura da ordem de 300 a 600°C e apresenta vantagens, tal como o menor risco potencial de formação de dibenzodioxinas e dibenzofuranos policlorados (WIGGERS, 2003), bem como a inertização dos resíduos em relação ao decaimento biológico, evitando a geração de metano nas etapas posteriores de estocagem e destinação. Assim sendo, a aplicação do processo de pirólise em resíduos sólidos urbanos possui potencial para reduzir as emissões de gases de efeito estufa, pois o gás metano deixa de ser gerado em qualquer utilização posterior dos produtos do processo, além da possibilidade do incremento da geração de energia de origem renovável.

Vários autores citam o uso da pirólise no tratamento de resíduos sólidos contendo matéria orgânica (BENTO, 2004), resíduos plásticos (GONÇALVES, 2007), resíduos perigosos (GIARETTA, 2007), biomassa (MESA *et al.*, 2003), pneus (GARCIA *et al.*, 2007), para citar alguns estudos. No caso dos resíduos sólidos urbanos, Martins *et al.* (2007) consideram a pirólise como alternativa promissora de tratamento, em virtude das enormes quantidades de resíduos sólidos urbanos gerados mundialmente e do indesejável impacto ambiental consequente. Alternativas inovadoras têm sido propostas para aproveitamento do potencial energético dos RSU com aplicação do processo de pirólise combinado com o ciclo de geração elétrica (BAGGIO *et al.*, 2008). Esses estudos fundamentam que com a aplicação no tratamento de resíduos sólidos, o processo pode permitir a geração de menor quantidade de poluentes, além da formação de subprodutos reutilizáveis com teor energético significativo ou com algum valor econômico agregado.

Com a motivação em buscas por soluções viáveis para o tratamento de resíduos, em 2005 foi desenvolvida uma proposta de projeto de pesquisa pela Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG, em parceria com instituições cotitulares para o estudo da aplicação do processo de pirólise em resíduos. Os ensaios foram realizados em escala de laboratório e em escala piloto. A partir de 2009, ocorreu o depósito de uma patente pela UFMG, da tecnologia desenvolvida no projeto de pesquisa, denominada “pyrolix”. Dentro desse projeto, estudos preliminares indicaram que o processo de pirólise pode se consolidar como uma alternativa para o gerenciamento de diversos tipos de resíduos.

O projeto contempla a avaliação do potencial de geração de energia elétrica no tratamento de resíduos sólidos urbanos (RSU) com aplicação do processo pyrolix, o qual tem como característica o uso de um circuito de fluido térmico para as trocas de calor entre a fonte primária de calor que é uma fornalha a biomassa, e o reator pirolítico. Será avaliado o potencial de geração de energia elétrica do processo aplicado ao tratamento de RSU de duas formas distintas: A partir do calor excedente gerado no processo que é transferido ao fluido térmico circulante, utilizando o ciclo orgânico de Rankine, bem como através da estocagem e encaminhamento do produto final carbonizado para uma central termoeletrônica, para utilização em substituição aos combustíveis tradicionais.

Na conversão de calor de baixas temperaturas em eletricidade, a maior eficiência é obtida utilizando-se um ciclo orgânico de Rankine. O Ciclo Orgânico de Rankine (ORC) é um ciclo onde um fluido orgânico substitui a água como fluido de trabalho (LARJOLA, 1995). Dessa forma, a partir da vaporização de fluidos orgânicos em caldeiras de baixa pressão, pode-se gerar eletricidade em turbogeradores. Diferente do ciclo de Rankine convencional, o ciclo orgânico de Rankine, utiliza um fluido para o qual a transição líquido/vapor ocorre a uma

temperatura e pressão menores do que para o sistema clássico baseado na água. Isso permite que o sistema funcione em temperaturas e pressões inferiores às temperaturas e pressões usuais nas termoeletricas. Basicamente, o sistema é composto por um trocador de calor (fluido térmico/fluido orgânico), uma turbina, um condensador e uma bomba, sendo assim possível a conversão de calor excedente em eletricidade.

O ORC oferece vantagens expressivas sobre o Ciclo de Rankine convencional, por produzir trabalho útil eficientemente em fontes de calor a temperaturas a partir de 370 °C (HUNG *et al.*, 1997) e ainda oferece outras vantagens como longa vida de serviço, baixo custo de manutenção e operação totalmente automatizada (OBERNBERGER *et al.*, 2002). Donghong *et al.* (2006) consideram o equipamento ORC flexível e seguro. Nos últimos anos, a aplicação do ORC tem se tornado mais comum nas plantas de geração de energia, devido à possibilidade de usar calor de exaustão de baixa temperatura (SCHUSTER *et al.*, 2009).

A segunda forma de aproveitamento energético proposta na pesquisa consiste no aproveitamento do produto carbonizado obtido na pirólise como combustível em uma central termoeletrica. O sistema idealizado modifica o conceito usual de geração de energia elétrica a partir de RSU. O conceito das plantas de geração de energia elétrica com resíduos, atualmente disseminado em todo o mundo, contempla o transporte desses resíduos *in natura* até as plantas de incineração, limitando dessa forma o raio de atuação para captação dos resíduos, pelo fato de que eles são biologicamente degradáveis e não inertes, e consequentemente a escala das plantas é limitada ao arranjo logístico para transporte e estocagem de resíduos em estreita sintonia com a capacidade de processamento dos incineradores. O processo de pirólise, por produzir um produto carbonizado biologicamente estável e de maior valor energético agregado, com a eliminação completa da umidade e uniformidade da composição química, amplia as distâncias viáveis para transporte, bem como possibilita o tratamento térmico de resíduos urbanos de forma descentralizada, com aproveitamento energético em locais distintos do ponto de processamento dos resíduos. Propõe-se dessa forma, com o desenvolvimento do estudo, um novo modal energético a ser caracterizado na pesquisa, o resíduo urbano carbonizado (RUC), para ser utilizado em substituição a outros combustíveis tradicionais nas centrais térmicas de geração de energia.

A Tabela 1 apresenta os resultados obtidos por Buah *et al.* (2007) na avaliação do poder calorífico dos produtos carbonizados provenientes do processo de pirólise de RSU submetidos a diversas temperaturas de reação.

**Tabela 1: Poder calorífico obtido do produto carbonizado de RSU submetido ao processo de pirólise a diversas temperaturas**

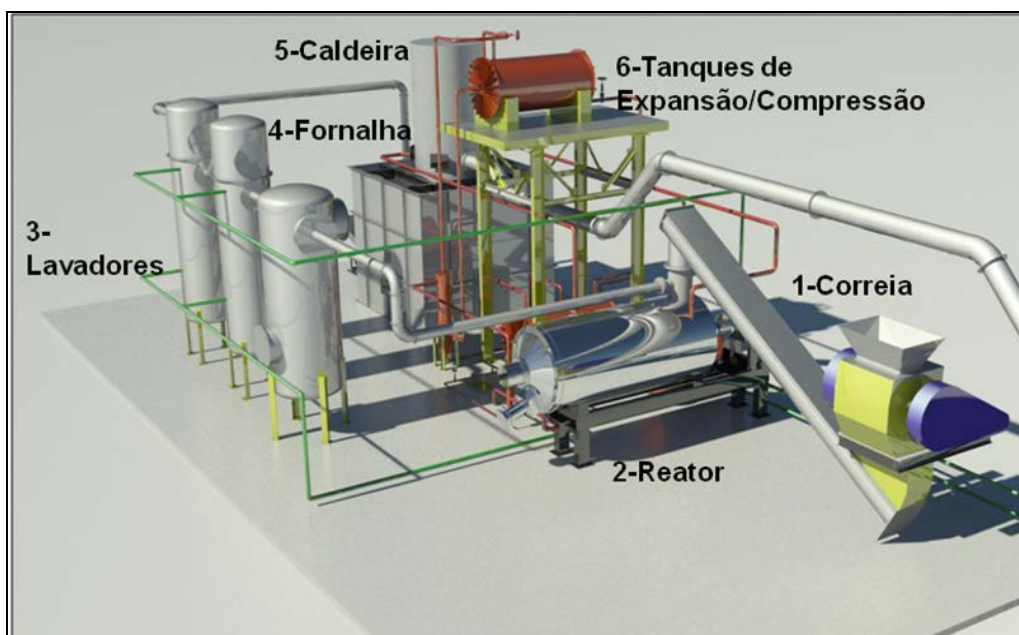
Temperatura (°C)	400	500	600	700
Poder calorífico (MJ.kg <sup>-1</sup> )	20,4	16,7	16,4	11,2

Fonte: Buah et al. (2007)

O problema relacionado ao gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos é um tema de grande relevância, debatido em municípios de grande, médio e pequeno porte. A proposta de desenvolvimento de uma solução inovadora que agrega a possibilidade de geração de energia elétrica sem a limitação da escala justifica a relevância desse capítulo do trabalho, frente ao desafio a ser transposto pela sociedade no gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Para o estudo foram concebidas três diferentes configurações para as plantas de pirólise. As configurações foram desenvolvidas a partir de um dispositivo tecnológico denominado “pyrolix”, com depósito de patente junto ao INPI sob número PI 0903587-7, e titularidade pertencente à Universidade Federal de Minas Gerais - UFMG. Trata-se de um processo de pirólise, o qual promove a decomposição térmica da matéria orgânica em atmosfera com ausência ou deficiência de oxigênio, valendo-se do uso de um fluido térmico circulante para o aquecimento dos reatores. A Figura 1 representa de forma esquemática os principais elementos utilizados na planta de pirólise com aplicação do processo pyrolix.



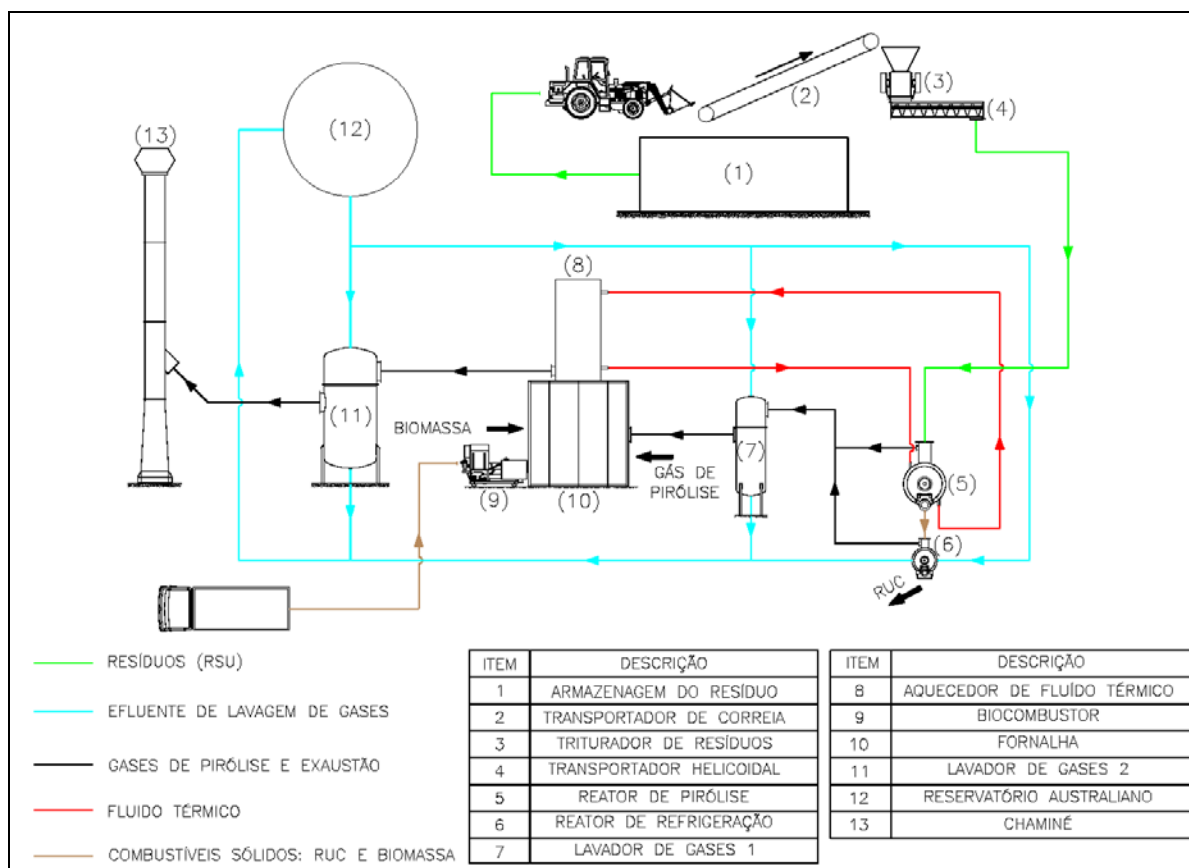
**Figura 1 – Representação esquemática do processo “pyrolix”**

Os resíduos para tratamento seguem pela esteira de alimentação até o reator, e a partir daí é iniciado o processo de tratamento térmico propriamente dito. Após cada carregamento, o reator é submetido a aquecimento indireto por meio de fluido térmico, o que promove dessa forma a carbonização dos resíduos sólidos urbanos (RSU) em ciclos intermitentes (bateladas).

O processo é endotérmico em sua fase inicial, na qual os RSU recebem calor do fluido térmico até atingirem temperaturas onde as reações se iniciam. Estas reações podem gerar calor a partir de certo momento, sendo este, eventualmente suficiente para a manutenção do processo. Da mesma forma, os gases e vapores formados possuem poder calorífico e serão aproveitados na caldeira de aquecimento do fluido. O fluido térmico opera em circuito fechado, transitando pelo reator e pela fornalha do aquecedor, o que mantém a temperatura em um patamar adequado para a manutenção do processo. Para a manutenção das temperaturas de processo, ou seja, 338°C no fluido térmico e 750°C na fornalha, é necessária a utilização de um combustível auxiliar, o qual poderá variar de acordo com cada configuração adotada, desde biomassa, resíduos agrícolas, biogás proveniente de processos de biometanização de RSU ou digestão anaeróbia de esgotos, ou até mesmo o próprio resíduo urbano carbonizado (RUC) no processo.

O tempo necessário para ocorrência do ciclo completo do processo de pirólise é de em torno de três horas e ao final dessa etapa, o produto obtido apresenta-se em forma de material orgânico carbonizado para ser encaminhado a uma etapa de resfriamento final. Para o arrefecimento da temperatura do produto serão utilizadas as águas de lavagem dos gases de pirólise, evitando-se dessa forma, a geração de efluentes líquidos em todas as configurações adotadas.

No presente trabalho, em cada configuração desenvolvida, foi avaliado o potencial de geração de energia elétrica do processo aplicado ao tratamento de RSU de duas formas distintas: A partir do calor gerado no processo pelo fluido térmico circulante, utilizando o ciclo orgânico de Rankine, bem como através do encaminhamento do produto carbonizado para uma central termoeletrica, para utilização em substituição aos combustíveis tradicionais. A Figura 2 apresenta o fluxograma para a primeira configuração.

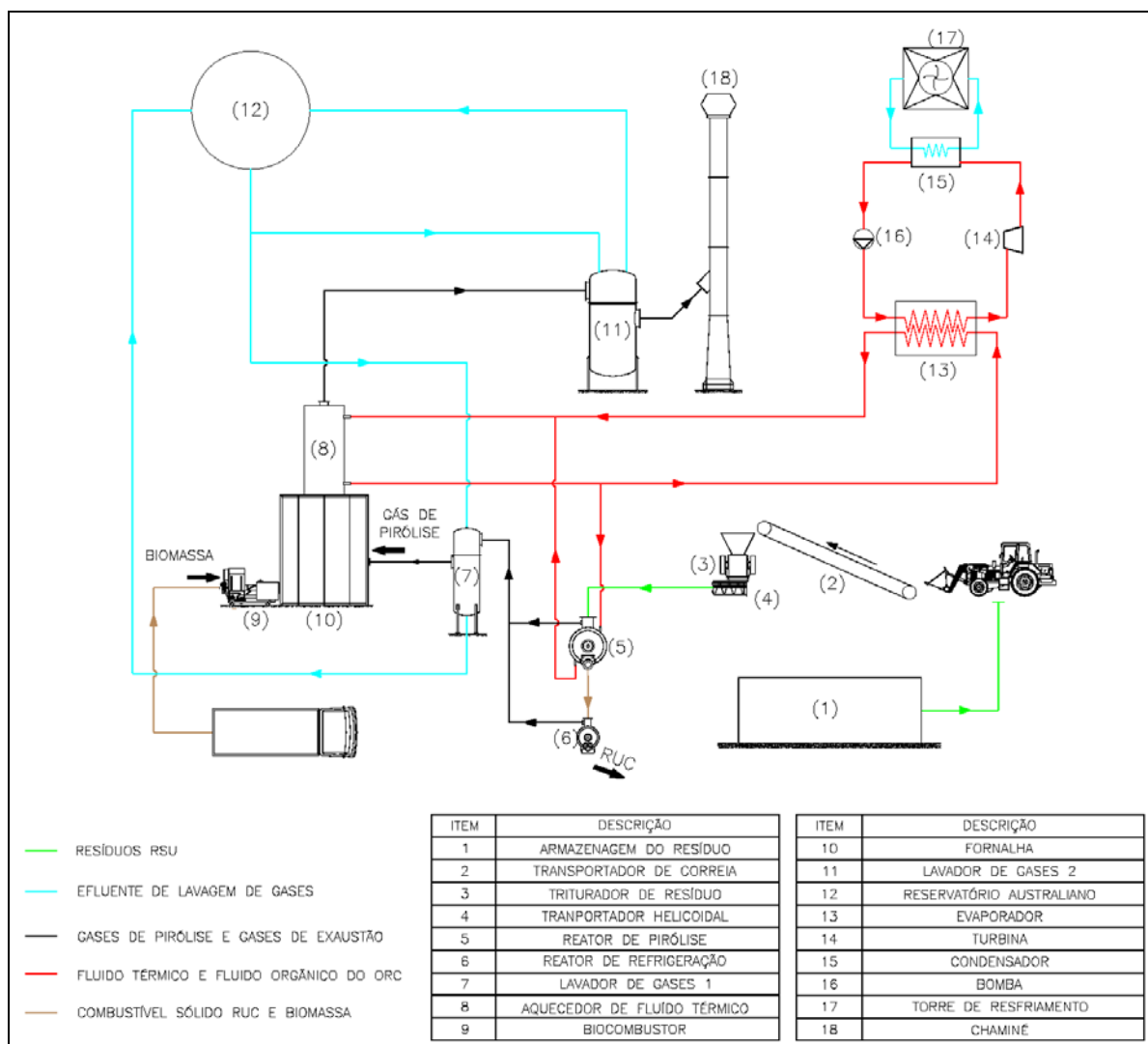


**Figura 2: Fluxograma da Configuração 1**

Nessa configuração, o potencial de geração de energia foi avaliado através da geração de energia em uma termoeletrica com ciclo de Rankine convencional (turbinas a vapor), com eficiência proposta de 30%, utilizando o RUC como combustível.

Na segunda configuração, adicionou-se à primeira um módulo ORC (Organic Rankine Cycle), em paralelo com o reator de pirólise, possibilitando assim a geração de energia a partir da troca de calor do fluido térmico com o fluido orgânico do módulo ORC, para o auto suprimento de energia elétrica da planta. O módulo ORC é composto de um trocador de calor (fluido térmico/fluido orgânico), uma turbina, um condensador e uma bomba, sendo assim possível a conversão de calor excedente em eletricidade. Diferente do ciclo de Rankine convencional, o ORC utiliza um fluido orgânico de alta massa molecular em que a transição líquido-vapor ocorre a uma temperatura menor do que a da água. Isso permite que o módulo funcione em temperaturas e pressões inferiores às temperaturas e pressões usuais, quando o fluido utilizado é a água. A Figura 3 apresenta o fluxograma do processo.

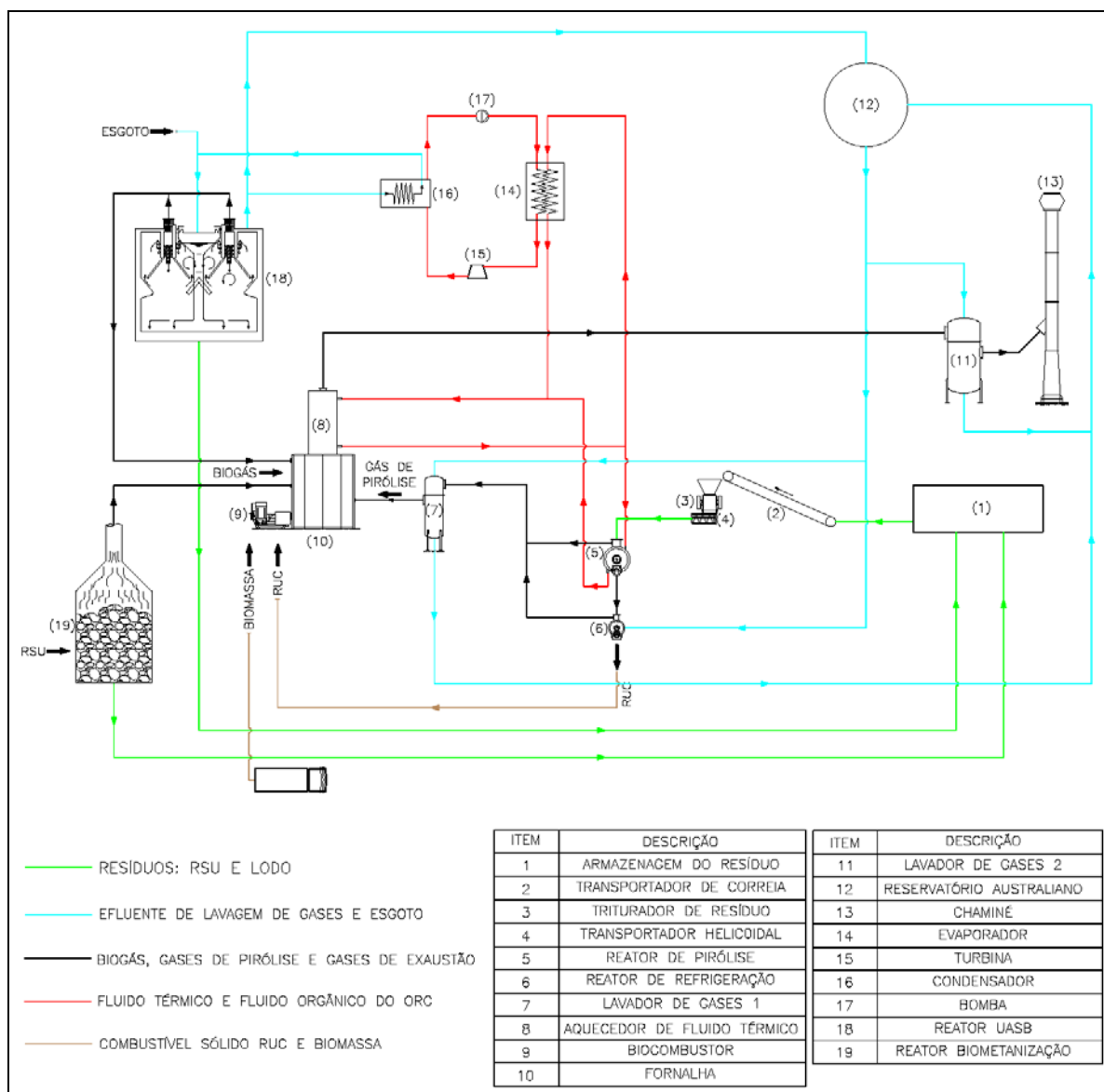




**Figura 3: Fluxograma da Configuração 2**

Nesta configuração, o potencial de geração de energia da planta foi avaliado considerando o potencial de geração de energia do módulo ORC para o auto suprimento da planta, em conjunto com o RUC que será encaminhado para uma central termoeletrica convencional, obtendo-se dessa forma a geração de energia elétrica em dois pontos distintos.

A terceira configuração integra o sistema de coleta e tratamento de esgotos por via anaeróbia com o tratamento dos RSU através de um processo de biometanização em fermentadores anaeróbicos. O biogás obtido a partir de um reator de tratamento anaeróbio de efluentes (reator UASB) e da biometanização dos resíduos sólidos urbanos é utilizado como combustível auxiliar na fornalha da planta de pirólise, em conjunto com o gás de pirólise gerado nos reatores, biomassa e o produto carbonizado resultante do processo. A produção de metano em sistemas de fermentação de RSU tem sido modelada por diversos estudos (FDEZ-GÜELFO *et al.*, 2012), mas o produto obtido após o processo de biometanização tem que ser encaminhado a outro processo, tal como a pirólise. Essa configuração possui um módulo ORC operando em paralelo com o reator de pirólise, para geração de energia para auto suprimento da planta e para fornecimento do excedente à rede de energia elétrica. A Figura 4 ilustra o processo.



**Figura 4: Fluxograma da Configuração 3**

Na operação da configuração 3 várias integrações de fluxos foram propostas. Parte do efluente do reator UASB será utilizada no condensador do módulo ORC, e voltará novamente para o reator com uma temperatura maior, buscando otimizar assim, a temperatura de operação do reator UASB. Os reatores de pirólise deverão processar os resíduos sólidos urbanos, após a passagem pelo processo de biometanização, juntamente com o lodo de descarte do reator UASB. Nesta configuração, o potencial foi avaliado considerando, além da energia de auto suprimento da planta, a energia que será exportada para a rede.

Em cada configuração proposta, foi avaliado o potencial energético a ser obtido com a exportação do produto carbonizado (RUC) e com a geração de energia elétrica na própria planta, para o auto suprimento e para exportação, de acordo com as especificações técnicas apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2: Especificações técnicas das plantas de pirólise em diferentes configurações**

Configuração	População	RSU gerado*	Especificação técnica da planta
1	15.000 habitantes	9.000 kg.dia <sup>-1</sup>	Reatores de pirólise com volume de 3 m <sup>3</sup> (2 unidades), interligados a aquecedor de fluido térmico com capacidade de 400.000 kcal.h <sup>-1</sup> , vazão total de fluido térmico de 39 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> , ΔT de 28°C, demanda de energia elétrica na planta de 66 kW.
2	30.000 habitantes	18.000 kg.dia <sup>-1</sup>	Reatores de pirólise com volume de 6 m <sup>3</sup> (2 unidades), interligados a aquecedor de fluido térmico com capacidade de 1.250.000 kcal.h <sup>-1</sup> , vazão total de fluido térmico de 110 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> , ΔT de 28°C, demanda de energia elétrica na planta de 100 kW.
3	50.000 habitantes	30.000 kg.dia <sup>-1</sup>	Reatores de pirólise com volume de 9 m <sup>3</sup> (2 unidades), interligados a aquecedor de fluido térmico com capacidade de 3.000.000 kcal.h <sup>-1</sup> , vazão total de fluido térmico de 266 m <sup>3</sup> .h <sup>-1</sup> , ΔT de 28°C, demanda de energia elétrica na planta de 150 kW.

\*RSU com características orgânicas, submetido a processo de triagem prévia

Para as avaliações do potencial de geração de energia, foram adotados valores típicos de entalpia e densidade (ρ) de fluidos térmicos disponíveis no mercado, conforme a Tabela 3.

**Tabela 3: Entalpias (h) e densidades (ρ) do fluido térmico em função da temperatura (T)**

T (°C)	h (kJ/kg)	ρ (kg/m <sup>3</sup> )
304	643,5	-
310	658,0	-
316	672,5	-
327	701,9	786
338	731,9	777

Para estimativa do potencial energético do produto carbonizado obtido a partir da pirólise dos resíduos sólidos urbanos, serão adotadas, em todas as configurações, o valor de 20,4 MJ.kg<sup>-1</sup> em conformidade com o valor sugerido por Buah et al. (2007). O rendimento gravimétrico do processo será estimado em 40%, de acordo com testes realizados no aparato experimental, com pirólise de RSU.

Para realização das estimativas na primeira e na segunda configuração, foi utilizado como combustível auxiliar apenas biomassa a ser adquirida (cavacos de madeira provenientes de podas urbanas, resíduos agrícolas e agroindustriais, serragem, etc). Na terceira configuração, além da biomassa adquirida, serão utilizados como combustíveis auxiliares, o resíduo urbano carbonizado (RUC) e biogás proveniente de reatores de biometanização tratando RSU e reatores anaeróbios tratando esgotos domésticos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na configuração 1, todo o produto carbonizado obtido (RUC), deverá ser encaminhado a uma central termoeletrica para ser utilizado em substituição aos combustíveis tradicionais. Considerando a geração de 9.000 kg de RSU por dia com rendimento gravimétrico de 40%, a geração estimada de RUC (M<sub>RUC</sub>) será de 3.600 kg por dia. Adotando-se o poder calorífico inferior (PCI) para o RUC de 20,4 MJ.kg<sup>-1</sup>, calcula-se o potencial de energia contida no produto a ser exportado pela planta (Q):

$$\text{Energia (Q)} = M_{\text{RUC}}/\text{dia} * \text{PCI} \quad \text{equação (1)}$$

$$\text{Energia (Q)} = 3.600 \text{ kg.dia}^{-1} * 20,4 \text{ MJ.kg}^{-1} = 73.440 \text{ MJ.dia}^{-1} = 850 \text{ kWt}$$



Na estimativa, foi considerada a operação contínua (24 h/dia) das unidades de geração e consumo de energia térmica (índice 't') e elétrica (índice 'e') como base para determinação da potência nominal gerada e/ou consumida. Considerando que o produto carbonizado será enviado a uma central termoeletrica e adotando as eficiências usuais de 30% ( $\eta$ ) obtém-se a estimativa de potência (P) a ser alcançada com o novo modal energético (Equação 2):

$$P = Q * \eta \quad \text{equação (2)}$$

$$P = (850 \text{ kWt}) * 0,30 = 255 \text{ kWe}$$

Na configuração 2, além do produto carbonizado ser encaminhado a uma central termoeletrica para ser utilizado em substituição a combustíveis tradicionais, deve-se estimar a geração de energia elétrica para auto suprimento da planta, através do dimensionamento de um módulo ORC, a ser acoplado na estrutura. Considerando a geração de 18.000 kg de RSU por dia com rendimento gravimétrico de 40%, a geração estimada de RUC será de 7.200 kg por dia. Adotando-se o poder calorífico inferior (PCI) para o RUC de 20,4 MJ.kg<sup>-1</sup>, calcula-se o potencial de energia contida no produto a ser exportado pela planta (Equação 1):

$$\text{Energia (Q)} = 7.200 \text{ kg.dia}^{-1} * 20,4 \text{ MJ.kg}^{-1} = 146.880 \text{ MJ.dia}^{-1} = 1700 \text{ kWt}$$

Considerando que o produto carbonizado será enviado a uma central termoeletrica e adotando as eficiências usuais de 30% ( $\eta$ ) obtém-se a estimativa de potência (P) a ser alcançada com o novo modal energético (Equação 2):

$$P = (1700 \text{ kWt}) * 0,30 = 510 \text{ kWe}$$

Para o dimensionamento do módulo ORC a ser acoplado na planta, visando o auto suprimento da instalação, tem-se como dados de entrada:

Temperatura de entrada do fluido do térmico no módulo ORC:  $T_f = 338^\circ\text{C}$

Pressão de operação do fluido de térmico  $P_f = 8 \text{ bar}$

Diferencial de temperatura no aquecedor de fluido térmico:  $\Delta T_{aq} = 28^\circ\text{C}$

Vazão volumétrica do fluido térmico para o módulo ORC:  $(AV)_f = 54 \text{ m}^3/\text{h}$

Entalpia de entrada:  $h_e = 731,9 \text{ kJ/kg}(338^\circ)$

Entalpia de saída:  $h_s = 658,0 \text{ kJ/kg}$

Densidade do fluido térmico:  $\rho = 777 \text{ kg/m}^3(338^\circ\text{C})$

Pela Equação 3 determina-se a vazão mássica (VM):

$$VM = (AV) * \rho \quad \text{equação (3)}$$

$$VM = (54 \text{ m}^3/\text{h}) * 777 \text{ (kg/m}^3)$$

$$VM = 41.958 \text{ kg/h}$$

Pela 1ª Lei da Termodinâmica, a variação de energia ( $\Delta E$ ) é igual a diferença entre calor (Q) e trabalho (W), de acordo com a Equação 4:

$$\Delta E = Q - W \quad \text{equação (4)}$$

Como o trabalho é igual a zero ( $W=0$ ), pode-se considerar a variação de energia igual ao calor disponível ( $\Delta E=Q$ ).

Assim sendo, o calor disponível pode ser calculado através do produto obtido entre a vazão mássica (VM) e a diferença entre as entalpias de saída ( $h_s$ ) e entrada ( $h_e$ ). Como o calor está sendo liberado pelo fluido térmico, o resultado obtido é sempre negativo (perda de calor), de acordo com a Equação 5.

$$Q = VM * (h_s - h_e) \quad \text{equação (5)}$$

$$Q = (41.958 \text{ kg/h}) * (658 - 731,9) \text{ kJ/kg}$$

$$Q = -3.100.696,2 \text{ kJ/h ou } 861,3 \text{ kWt}$$

Considerando uma eficiência ( $\eta$ ) do módulo ORC de 12%, para geração de energia elétrica, obtém-se a estimativa da potência (P) através da Equação 2:

$$P = (861,3 \text{ kWt}) * 0,12 = 103,36 \text{ kWe (geração de energia elétrica estimada para o auto suprimento da planta)}$$

Na configuração 3, todo o produto carbonizado obtido (RUC) será encaminhado para a fornalha de aquecimento de fluido térmico em conjunto com os demais combustíveis auxiliares, assim sendo, toda a energia elétrica será gerada na própria planta através do acoplamento de um módulo ORC na estrutura de circulação de fluido térmico.

Para o dimensionamento do módulo ORC a ser acoplado na planta, tem-se como dados de entrada:

Temperatura de entrada do fluido do térmico no módulo ORC:  $T_f = 338^\circ\text{C}$

Pressão de operação do fluido de térmico  $P_f = 8 \text{ bar}$

Diferencial de temperatura no aquecedor de fluido térmico:  $\Delta T_{aq} = 28^\circ\text{C}$

Vazão volumétrica do fluido térmico para o módulo ORC:  $(AV)_f = 166 \text{ m}^3/\text{h}$

Entalpia de entrada:  $h_e = 731,9 \text{ kJ/kg}(338^\circ)$

Entalpia de saída:  $h_s = 658,0 \text{ kJ/kg}$

Densidade do fluido térmico:  $\rho = 777 \text{ kg/m}^3(338^\circ\text{C})$

Pela Equação 3 determina-se a vazão mássica (VM):

$$VM = (166 \text{ m}^3/\text{h}) * 777 \text{ (kg/m}^3)$$

$$VM = 128.982 \text{ kg/h}$$

Pela equação 5, calcula-se o calor disponível:

$$Q = (128.982 \text{ kg/h}) * (658 - 731,9) \text{ kJ/kg}$$

$$Q = -9.531.769,8 \text{ kJ.h}^{-1} \text{ ou } 2.647,7 \text{ kWt}$$

Considerando uma eficiência ( $\eta$ ) do módulo ORC de 12%, para geração de energia elétrica, obtém-se a estimativa da potência (P) através da Equação 1:

$$P = (2.647,7 \text{ kWt}) * 0,12 = 317,72 \text{ kWe (geração de energia elétrica estimada para o auto suprimento da planta e para exportação de energia).}$$

Nas duas primeiras configurações, em função do encaminhamento do RUC para centrais termoelétricas externas à planta, considerando-se as eficiências usuais de 30% nessas instalações, pode-se estimar uma taxa de 17,0We por habitante, em relação à capacidade instalada das usinas térmicas. Na terceira configuração, com o consumo de todo o RUC na própria planta de pirólise para geração de energia elétrica em um módulo ORC, com eficiência adotada de 12%, a taxa de geração de energia elétrica foi estimada em 6,4We por habitante.

## CONCLUSÕES

O presente trabalho apresenta alternativas tecnológicas inovadoras, as quais contemplam duas possibilidades de geração de energia elétrica: a geração na própria planta de pirólise através do ciclo orgânico de Rankine (ORC) e a exportação de um combustível (produto carbonizado obtido) com potencial para substituição dos combustíveis tradicionais utilizados em centrais termoelétricas.

As configurações propostas modificam o conceito usual de geração de energia elétrica a partir do aproveitamento energético dos RSU. O conceito das plantas de geração de energia elétrica com resíduos, atualmente disseminado em todo o mundo, contempla o transporte desses resíduos sem tratamento até as plantas, limitando dessa forma o raio de atuação para captação dos resíduos e consequentemente a escala das plantas. O processo de pirólise, por produzir um produto carbonizado biologicamente estável com valor energético agregado, amplia as distâncias viáveis para transporte, bem como possibilita o tratamento térmico de resíduos urbanos de forma descentralizada, com aproveitamento energético em locais distintos do ponto de

processamento dos resíduos. A conjugação entre tratamento de RSU e esgotos domésticos é também otimizada do ponto de vista energético.

## AGRADECIMENTOS

Os autores manifestam seus agradecimentos à Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG pelo financiamento do projeto P&D e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pelo apoio institucional.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AIRES R. D., LOPES T. A., BARROS R. M., CONEGLIAN C. M. R., SOBRINHO G. D., TONSO S., PELEGRINI R.. III Fórum de Estudos Contábeis. Rio Claro, São Paulo, 2003.
2. BAGGIO, P.; BARATIERE, M.; GASPARELLA A.; LONGO G.A. Energy and environmental analysis of an innovative system based on municipal solid waste (MSW) pyrolysis and combined cycle. *Applied Thermal Engineering*, v. 28, p. 136-144, 2008.
3. BENTO, M. S.. Estudo cinético da pirólise de precursores de materiais carbonosos. Engenharia Aeronáutica e Mecânica. Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA). Dissertação de mestrado, 2004.
4. BUAH, W.K.; CUNLIFFE, A.M.; WILLIAMS, P.T. Characterization of products from the pyrolysis of municipal solid waste. *Process safety and Environmental Protection*, v. 85 (B5), p. 450-457, 2007.
5. DONGHONG, W.; LU, X.; LU, Z.; GU, J. Performance analysis and optimization of organic Rankine cycle (ORC) for waste heat recovery. *Energy Conversion and Management*, v.48, p. 1113-1119, 2007.
6. FDEZ-GÜELFO L.A.; ÁLVAREZ-GALLEGO C.; SALES D.; GARCÍA L.I.R. Dry-thermophilic anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste: Methane production modeling. *Waste Management*, v.32, p. 382-388, 2012.
7. GARCIA I. T. S.; NUNES M. R.; CARREÑO N. L. V.; WALLAW W. M.; FAJARDO H. V.; PROBST L. F. D.. Obtenção e caracterização de carbono ativado a partir de resíduos provenientes de bandas de rodagem. *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, 17(4): 329 – 333, 2007.
8. GIARETTA, E.. Reciclagem de borra de tinta via Pirólise. Centro de Ciências Exatas e Tecnologia. Departamento de Engenharia Química. Universidade de Caxias do Sul – UCS. Dissertação de mestrado, 2007.
9. GONÇALVES, C. K. Pirólise e combustão de resíduos plásticos. Engenharia de Materiais. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Dissertação de mestrado, 2007.
10. HUNG, T.C.; SHAI, T.Y.; WANG, S.K. A review of organic Rankine cycles (ORCs) for the recovery of low-grade waste heat. *Energy*, v.22, p. 661-667, 1997.
11. LARJOLA, J. Electricity from industrial waste heat using high-speed organic Rankine cycle (ORC). *International Journal of Production Economics*, v. 41, p. 227-235, 1995.
12. MARTINS A. F.; DINIZ, J.; STAHL J. A.; CARDOSO A. L. Caracterização dos produtos líquidos e do carvão da pirólise de serragem de eucalipto. *Química Nova*, 30(4): 873 – 878, 2007.
13. MESA J. M.; ROCHA J. D.; OLIVARES E.; BARBOZA L. A.; BROSSARD L. E.; BROSSARD JR, L. E. Pirólise rápida em leito fluidizado: uma opção para transformar biomassa em energia limpa. *Revista Analytica*, 04: 32 – 36, 2003.
14. OBERNBERGER, I.; THONHOFER, P.; REISENHOFER, E. Description and evaluation of the new 1000kW organic Rankine cycle process integrated in the biomass CHP plant in Lienz, Austria. *Euroheat & Power*, v. 10, 2002
15. SCHUSTER, A.; KARELLAS, S.; KAKARAS, E.; SPLIETHOFF, H. Energetic and economic investigation of Organic Rankine Cycle applications. *Applied Thermal Engineering*, v. 29, p. 1809-1817, 2009.
16. UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY – USEPA -. Technology Transfer Network. 2011. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttn/>>. Acesso em 20 de fevereiro de 2011.
17. WIGGERS, V. R.. Simulação, projeto e construção de uma unidade piloto multi-propósito para pirólise de resíduos. Faculdade de Engenharia Química. Universidade Estadual de Campinas. Dissertação de mestrado, 2003.