

### III-265 - CRÉDITOS DE CARBONO EM PROJETO DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS: ESTUDO DE CASO

**Andréia Cristina Trentin<sup>(1)</sup>**

Engenheira Ambiental formada pela Universidade de Caxias do Sul - UCS. Bolsista de Desenvolvimento Tecnológico Industrial do CNPq pela Rede Nacional de Capacitação e Extensão Tecnológica em Saneamento Ambiental – ReCESA. Apoio Técnico do Instituto de Saneamento Ambiental – ISAM – da Universidade de Caxias do Sul – UCS. Consultora em Engenharia e Meio Ambiente.

**Geraldo Antonio Reichert**

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul - UFRGS. Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental pelo Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH da UFRGS. Engenheiro do Departamento Municipal de Limpeza Urbana - DMLU de Porto Alegre. Professor do Curso de Engenharia Ambiental da UCS.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Rua Tronca, Número 1745 - Bairro Exposição - Caxias do Sul – Rio Grande do Sul - CEP: 95010-100 - País - Tel: +55 (54) 9963-3224 - e-mail: [andreiactr@yahoo.com.br](mailto:andreiactr@yahoo.com.br)

#### RESUMO

Este artigo engloba parte de um estudo anteriormente realizado para o município de Caxias do Sul, sendo este, um trabalho de conclusão de curso em Engenharia Ambiental (TRENTIN, 2009). A crescente geração de resíduos sólidos, tendo esta um grande potencial poluidor, leva a necessidade de se desenvolver novas técnicas de tratamento dos resíduos. Neste estudo, priorizou-se o reaproveitamento mais abrangente possível dos resíduos sólidos urbanos do município. Deste modo, cita-se a implantação de um Complexo de Biodigestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos. Este empreendimento visa equacionar o desequilíbrio entre a produção dos resíduos e as insuficientes possibilidades de dispô-los corretamente. Assim, propõe-se inicialmente uma triagem a fim de reintroduzir estes subprodutos no ciclo produtivo. Após, a fração orgânica será digerida em reatores fechados, onde haverá geração de biogás, que após sua purificação virá a ser transformado em energia elétrica. Como saída desta biodigestão, se terá ainda um composto que será comercializado como biofertilizante. Este projeto, além de contribuir para a sustentabilidade ambiental, social e econômica através deste tratamento/reaproveitamento diferenciado dos resíduos, trás a possibilidade de obtenção de Créditos de Carbono junto ao mercado internacional, devido ao fato de esta proposta reduzir a emissão de gases intensificadores do efeito estufa. Ainda, faz-se aqui, a estimativa desta geração para o cenário de linha de base e a diferenciação das emissões de CO<sub>2</sub> com a implantação deste Complexo. Tem-se então, para a o cenário de linha de base a emissão de 4.459.911,23 t Eq CO<sub>2</sub>, e para a alusão da implantação deste, a emissão de 192.429,39 t Eq CO<sub>2</sub>. Assim, o total de créditos de carbono gerados durante o período de vigência do projeto (21 anos) é de 4.229.420,60 tCO<sub>2</sub>, o que configura numa redução de emissão de CH<sub>4</sub> de aproximadamente 96 %. Neste artigo aborda-se ainda, a viabilidade econômica deste empreendimento, dando enfoque a receita suscitada pela venda dos créditos de carbono. Várias alternativas e cenários foram avaliadas, sendo apenas uma considerada inviável economicamente, e duas autossustentáveis, ou seja, não requerem pagamento da prefeitura pelo tratamento dos resíduos. Com a análise das simulações para a implantação deste empreendimento, observa-se a homogeneidade das receitas que dão suporte ao projeto, sendo a venda dos créditos de carbono, responsável por aproximadamente 16 % do total arrecadado na planta.

**PALAVRAS-CHAVE:** Créditos de Carbono, Biodigestão Anaeróbia, Resíduos Sólidos Urbanos, Caxias do Sul.

#### INTRODUÇÃO

Os Resíduos Sólidos Urbanos - RSU - vêm se tornando um dos mais sérios problemas que a sociedade moderna enfrenta. Sua disposição de forma inadequada provoca a degradação do meio ambiente, a contaminação dos recursos naturais e gera impactos negativos também na economia e sociedade. O correto manejo dos resíduos é um dos principais desafios dos centros urbanos, daí a importância do reaproveitamento dos resíduos para reciclagem, fabricação de composto orgânico e geração de energia elétrica.

Dentro da preocupação de melhor aproveitar os RSU e reduzir sobremaneira o material depositado nos aterros sanitários, propõe-se aqui, procedimentos para o aproveitamento mais abrangente possível dos RSU no

município de Caxias do Sul. Estes métodos visam equacionar o desequilíbrio entre a produção dos resíduos e as insuficientes possibilidades de dispô-los corretamente. Buscou-se aqui também, conseqüentemente ao seu reaproveitamento máximo, o mínimo de rejeito final, sendo este reduzido em aproximadamente 30 % com esta alternativa de tratamento dos subprodutos.

Destarte, preconiza-se a implantação de um Complexo de Biodigestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos para o Município de Caxias do Sul. Este Complexo promoverá a reciclagem dos Resíduos Sólidos Recicláveis através da triagem dos resíduos. Após o reaproveitamento dos resíduos recicláveis provenientes da coleta domiciliar municipal, a fração orgânica dos resíduos será biodigerida em reatores fechados da planta comercial Valorga (SINGH, 2002). Como saídas desta biodigestão, se terá um composto pré-estabilizado, que será compostado, maturado e depois comercializado como biofertilizante agrícola. Além deste composto, haverá a geração de biogás, que após sua purificação virá a ser transformado em energia elétrica. O verdadeiro rejeito resultante deste Complexo será encaminhado ao Aterro Sanitário do Município. Outro remanescente deste empreendimento será a possibilidade de obtenção de créditos de carbono junto ao mercado internacional, através das emissões evitadas a partir da biomassa não aterrada.

De tal modo, faz-se a estimativa da Geração de Créditos de Carbono para a linha de base e a diferenciação das emissões de CO<sub>2</sub> com a implantação deste.

## **DESCRIÇÃO DO COMPLEXO**

As etapas deste Complexo de Biodigestão Anaeróbia de RSU, conforme linha de processamento, estão divididas em Unidade de Controle e Pesagem, Unidade de Triagem e Beneficiamento, Unidade de Biodigestão Anaeróbia, Unidade de Compostagem e Maturação, e Unidade de Geração de Energia Elétrica, sendo estas expostas a seguir (Figura 1).

### **UNIDADE DE CONTROLE E PESAGEM**

Nesta unidade estará locada a guarita, que terá como desígnio a garantia do controle de entrada dos resíduos, visto que este empreendimento receberá apenas os resíduos da coleta domiciliar e resíduos provenientes de poda. Na lateral da guarita estará instalada uma balança rodoviária que fará a verificação do peso na balança, assim, os dados serão computados e impressos por funcionário responsável por esta etapa.

### **UNIDADE DE TRIAGEM E BENEFICIAMENTO**

Nesta unidade, serão realizados todos os processos referentes à obtenção dos recicláveis para posterior venda. Primeiramente, os resíduos serão depositados no fosso de recepção, tendo esta capacidade para armazenamento de dois dias de coleta. Após a deposição temporária e controlada, estes resíduos serão separados por triagem manual e mecanizada. Estes resíduos recicláveis serão então encaminhados para a área de beneficiamento, onde serão prensados e armazenados até sua comercialização. Os resíduos que continuarem na linha de processamento serão então triados mecanicamente através de quatro peneiras rotativas, dois separadores eletromagnéticos, dois trituradores e dois separadores balísticos, respectivamente. Esta Unidade terá como saída os rejeitos remanescentes da etapa de peneiramento e do separador balístico, sendo estes coletados por correia transportadora e encaminhados para acondicionamento em contêineres. Posteriormente, este rejeito será encaminhado através de caminhão para aterro sanitário. Resultante destes processos se obterá a fração orgânica, sendo esta encaminhada para a Unidade de Biodigestão Anaeróbia por meio de correia transportadora.

### **UNIDADE DE BIODIGESTÃO ANAERÓBIA**

Devido a apresentar maiores vantagens em relação às outras tecnologias existentes, está indicado neste, a implantação da Planta Comercial Valorga (TRENTIN, 2009). Nesta etapa, tem-se a digerir a fração orgânica passante de todos os outros processos (70.800 t/a) mais o ajuste de umidade. Para o ajuste do teor de sólidos, que é de 30 % para esta planta, baseia-se no Balanço de Água realizado para o ano base de dimensionamento, 2021, conforme Trentin e Reichert (2010). Para isto, será recirculado o lixiviado advindo do filtro-prensa (56.640 t/a) e ter-se-á ainda o volume de 10.040 t/a (mais fosso de recepção) a tratar em ETL.

## UNIDADE DE COMPOSTAGEM E MATURAÇÃO

Os sólidos provenientes do deságue serão encaminhados ao processo de compostagem, sendo a eles adicionados resíduos de poda. Optou-se pela compostagem em baias cobertas em pavilhão fechado, com aeração forçada, acarretando em maiores volumes tratados em áreas menores. Os resíduos arbóreos triturados serão dispostos na base de cada leira, estando assim sobre a tubulação de aeração. Eles serão triturados de forma a obter-se um material de partículas inferiores a 2,0 cm, e ao final do processo de compostagem de cada leira, estes serão reagregados ao próximo volume de material a compostar. A fim de evitar emissão de odores e gases, será disposta sobre cada leira uma cobertura com composto maturado, tendo esta camada uma espessura de 10,0 cm.

## UNIDADE DE GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA

Nesta etapa, propõe-se gerar energia elétrica para comercialização através da conversão do biogás advindo do processo de digestão anaeróbia. O biogás que é gerado na DA fica retido no próprio reator, em sua parte superior, utilizando para a armazenagem 20 % do tamanho total do módulo. O biogás armazenado no biodigestor será captado através de tubulação e enviado para a desumidificação. Após a remoção da umidade, ele alimentará um grupo motor-gerador, resultando em energia elétrica de fonte limpa e renovável.

Para a concepção deste Projeto, considerou-se ainda o Balanço de Massa apresentado por Trentin e Reichert (2010), no qual estão definidos os quantitativos que serão tratados na planta, bem como as entradas e saídas de cada etapa do processo global e os produtos finais. Tomando como base o ano de dimensionamento do projeto - 2021 - e considerando os dados de pré-dimensionamento relatados, definiu-se a implantação deste empreendimento numa área de 62.000,00 m<sup>2</sup>, a qual possibilitará também sua ampliação prevista para 2021. Na Figura 1, apresenta-se esta área, bem como a locação de todas as Unidades supramencionadas. É apresentado ainda, o fluxograma deste empreendimento, englobando nele todas as etapas de entradas e saídas do Complexo (Figura 2).

## BIODIGESTÃO ANAERÓBIA E MDL

O MDL é um dos instrumentos de flexibilização estabelecidos no artigo 12 do Protocolo de Kyoto, com o objetivo de facilitar o alcance das metas de redução de emissão de gases de efeito estufa e promover o desenvolvimento sustentável nos países em desenvolvimento (JMALUCELLI e CMC AMBIENTAL, 2009). Em contrapartida, estes países têm acesso a recursos financeiros e tecnologias.

Em síntese, a proposta do MDL consiste em que cada tonelada de CO<sub>2</sub> equivalente (tCO<sub>2</sub>e) que deixar de ser emitida ou for retirada da atmosfera por um país em desenvolvimento poderá ser negociada no mercado mundial, criando novo atrativo para a redução das emissões globais. Os projetos que se habilitam à condição de projeto de MDL devem cumprir uma série de procedimentos até receber a chancela da ONU, por intermédio do Conselho Executivo do MDL, instância máxima de avaliação de projetos de MDL.

## METODOLOGIA

Segundo JMalucelli e CMC Ambiental (2008), projetos de MDL que consistem em construção e operação de usina para geração de eletricidade através de uma central termelétrica que usa como combustível biomassa podem ser elegíveis perante Kyoto e gerar Créditos de Carbono.

Este projeto, além de ajudar a atender à crescente demanda de energia no Brasil, contribui também para a sustentabilidade ambiental, social e econômica através do aumento na participação da energia sustentável em relação ao consumo total de eletricidade no Brasil. Com sua implantação, será possível também substituir a construção de centrais elétricas que utilizariam combustíveis fósseis. Este projeto proporcionará ainda, o diferencial de evitar as emissões de metano provenientes da decomposição anaeróbica de resíduos, caso estes fossem dispostos em aterros.

Deste modo, tal projeto também envolve a atividade de “emissões evitadas” a partir de biomassa não aterrada. Assim, para projetos de MDL de tratamento e valorização de resíduos, além das emissões evitadas, deve-se

levar em conta a redução da emissão de CO<sub>2</sub> pelo transporte dos resíduos, bem como a não necessidade de queima de combustíveis não-renováveis para a geração de energia elétrica.

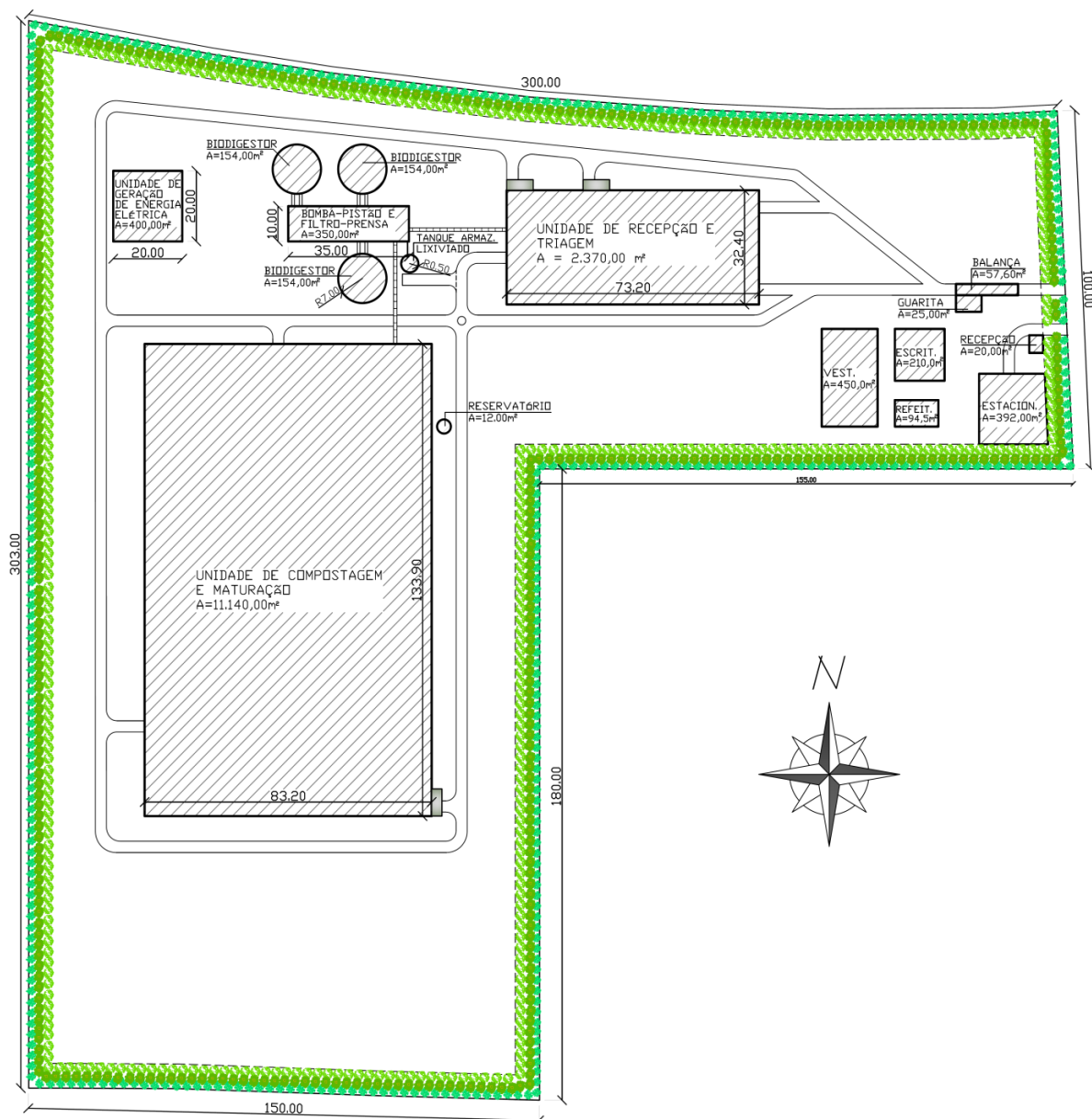


Figura 1: Área de implantação do Complexo de Biodigestão

## GERAÇÃO DE CRÉDITOS DE CARBONO

Para o cálculo da geração dos Créditos de Carbono, foi utilizado o Método US EPA - Modelo de Decaimento de Primeira Ordem da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos. Esta metodologia baseia-se no ingresso de energia no sistema a partir do CH<sub>4</sub>, e o consequente deslocamento da quantidade de CO<sub>2</sub> existente na matriz do sistema atribuída a fontes fósseis. Foram então definidos o cenário de linha de base (onde se considera a situação atual) e o cenário da implantação deste Complexo (Tabela 1).

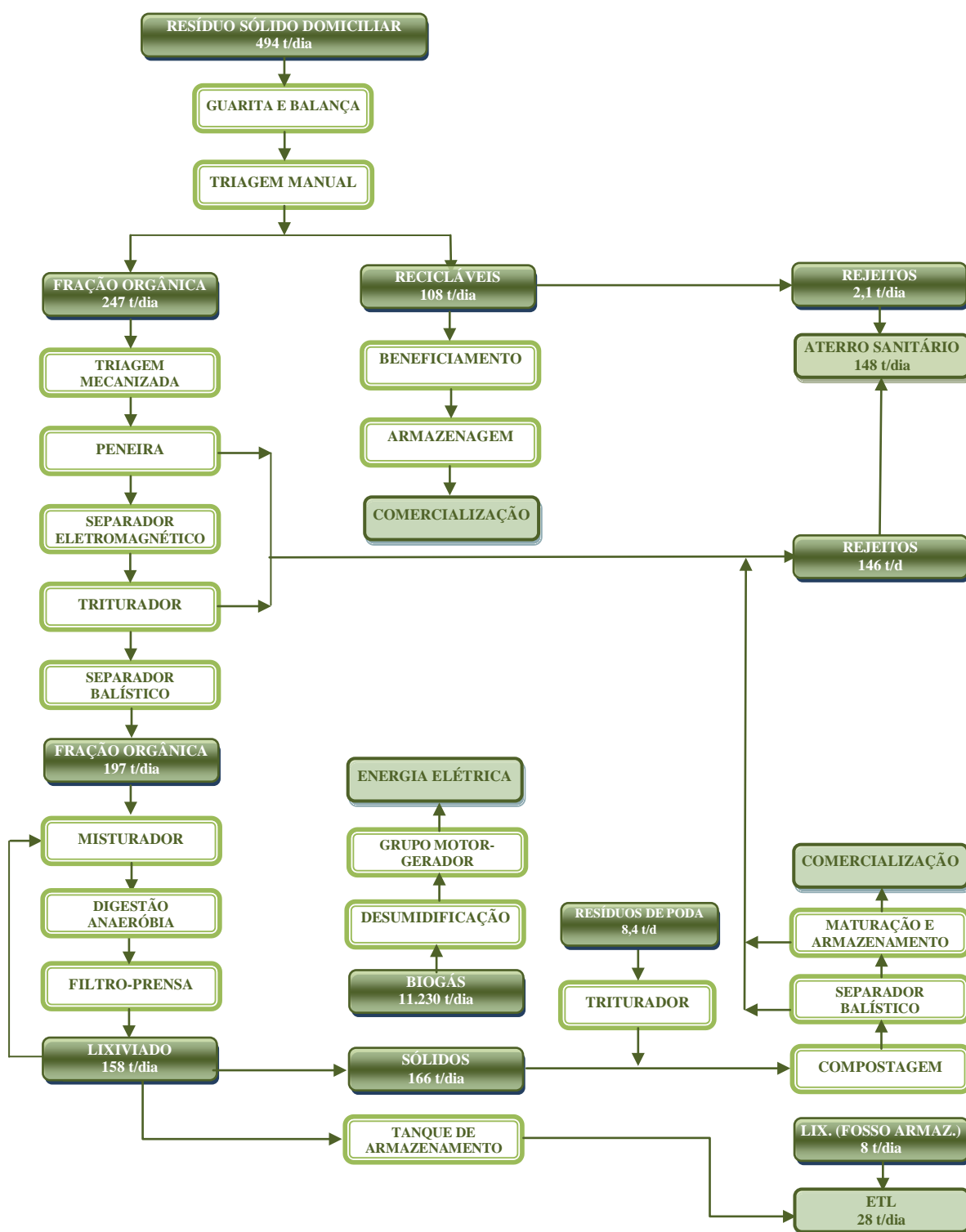


Figura 2: Fluxograma do sistema para o ano de dimensionamento

### Cenário de linha de base

Para a formulação deste cenário, visto ao histórico do município, considera-se a destinação final dos resíduos em aterro sanitário como cenário futuro mais provável durante o período proposto para obtenção de créditos nesta concepção. No ano de implantação do Sistema de Biodigestão Anaeróbia, entrará em operação o novo aterro do município, sendo este distante 37 km do centro do município. No âmbito deste estudo, serão estimadas as possíveis reduções de emissão atribuíveis à diminuição dos quantitativos de resíduos destinados para aterro sanitário.

Os projetos de aterro sanitário, geralmente apresentam sistemas de drenagem passiva de gases e queima em *flare*, sendo admitida uma baixa eficiência de captura, na ordem de 20 % do gás gerado. Assim sendo, será admitido aqui um percentual de 20% de CH<sub>4</sub> destruído.

#### Cálculo das Emissões de CH<sub>4</sub>

Para a estimativa da geração de CH<sub>4</sub>, utilizou-se o Método US EPA. Através deste método e do traçado de cenário de linha de base, estima-se a geração de CH<sub>4</sub> no caso da não implantação desta proposta. A fórmula do Modelo é demonstrada na Equação (1), a seguir.

$$Q_{CH_4} = L_0 \times R \times (e^{-kc} - e^{-kt}) \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

QCH<sub>4</sub> - Volume estimado de metano gerado no aterro (m<sup>3</sup>/a);

L<sub>0</sub> - Potencial de geração de metano do resíduo (kg de biogás/kg de RSU);

R - Taxa de disposição de resíduos (kg/ano),

e - base (adimensional),

k - Taxa de geração de metano (ano<sup>-1</sup>),

t - tempo desde que o aterro foi aberto (anos),

c - tempo desde quando o aterro foi encerrado (anos), (c=0 se o aterro ainda for ativo).

Para a determinação da constante k, taxa de geração de metano, é definida pela Equação (2), a seguir.

$$k = \frac{\ln(2)}{t_{1/2}} \quad \text{Equação 2}$$

Onde:

t<sub>1/2</sub> - tempo médio para 50 % da decomposição, sendo usual variações entre 4 e 10 anos para resíduos sólidos municipais (IPCC, 1996 *apud* REICHERT *et al.*, 2004).

Para climas úmidos, como o município em questão, os valores de k podem variar de 0,1 a 0,35 (US EPA, 1996 *apud* REICHERT *et al.*, 2004). Adotou-se então, uma meia vida de 4 anos.

Posteriormente, calcula-se o potencial de geração de metano do resíduo – L<sub>0</sub>. Este pode ser estimado utilizando-se a Equação (3) (IPCC, 1996 *apud* REICHERT *et al.*, 2004), a seguir.

$$L_0 = MCF \times DOC \times DOC_F \times F \times 16/12 \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

MCF - fator de correção do metano (%);

DOC - fração de carbono degradável (kg C/ kg RSU);

DOCF - fração de DOC dissolvida;

F - fração de metano no biogás;

16/12 - conversão de C para CH<sub>4</sub>.

Segundo Reichert *et al.* (2004), MCF é um fator que varia em função das condições de gerenciamento do local de destinação final dos resíduos. Aqui se considerou o envio dos RSU para aterro sanitário, assim, o método indica MCF = 1, pois os aterros são gerenciados de modo a favorecer a decomposição anaeróbia. Ainda, segundo mesma bibliografia, determina-se que DOC é calculado pela Equação (4).

$$DOC = 0,4 \times A + 0,17 \times B + 0,15 \times C + 0,3 \times D \quad \text{Equação 4}$$

Onde os fatores A, B, C e D, referem-se à caracterização do resíduo, e são expressos em percentual:

A = percentual de papel e tecidos;



B = Resíduo de jardins, parques e outros orgânicos não alimentares putrescíveis;

C = Resíduos de alimentos;

D = Resíduos de madeira e palha.

Para adequar a fórmula aos dados existentes adota-se a Equação (5), a seguir.

$$DOC = 0,4 \times A + 0,16 \times (B + C) + 0,3 \times D \quad \text{Equação 5}$$

Segundo a caracterização do resíduo de Caxias do Sul (ISAM, 2008 *apud* TRENTIN 2009), temos para  $A = 9,0 \%$ . Pela caracterização citada não é possível apropriar individualmente os termos B e C. Portanto, tomaremos para  $B + C$ , o percentual de 50 % definido como a parcela de matéria orgânica facilmente biodegradável. O valor de D corresponde ao percentual de madeira da caracterização, correspondendo a 0,6 %.

DOCF é um valor teórico, que pode ser calculado pela Equação (6), a seguir.

$$DOCF = 0,014 \times T + 0,28 \quad \text{Equação 6}$$

Onde:

T = temperatura na zona anaeróbia dos resíduos, e devendo encontrar-se na faixa de 30 a 35° C, estimada aqui em 33° C.

Para o valor de F utiliza-se o percentual de metano presente no gás gerado, aqui adotado em 60%.

Finalmente, é possível calcular a vazão de metano produzida pela disposição deste volume de resíduos em aterro sanitário. Estes valores, para o tempo de abrangência do projeto, encontram-se na Tabela 1.

#### *Cálculo das Emissões de CO<sub>2</sub> resultantes dos resíduos destinados a aterro sanitário*

As emissões de CO<sub>2</sub> devido à destinação de resíduos a aterro sanitário podem ser calculadas multiplicando-se a quantidade total de combustível requerida para o transporte em um determinado período, pelo fator de emissão de CO<sub>2</sub>. Aqui, utilizaremos 0,0027 tCO<sub>2</sub>/litro de óleo diesel (IPCC, 1996 *apud* REICHERT, 2004).

A quantidade de combustível necessária pode ser obtida pela multiplicação da distância total percorrida pelo consumo médio de combustível de um veículo transportador. Segundo estimativas, consideraremos o consumo em 0,4 litros de óleo diesel por quilômetro percorrido.

A distância percorrida pode ser estimada multiplicando-se o número de viagens necessárias para o transporte pela distância do ciclo carga/descarga/retorno que adotaremos 74 km (2 x 37 km). O número de viagens poderá ser estimado dividindo-se a quantidade de resíduos transportada pela capacidade de carga de um veículo transportador, hoje em média em 14 toneladas por veículo (CODECA, 2009). Logo, o valor das emissões associadas ao transporte de 1 t de resíduo ET, pode ser estimado pela Equação (7).

$$ET = Ct \times c \times d \times \frac{1}{cap} \quad \text{Equação 7}$$

Onde:

ET - emissões emitidas para o transporte de resíduos (tCO<sub>2</sub> / t RSU),

Ct - fator de emissão de CO<sub>2</sub> (tCO<sub>2</sub>/litro de óleo diesel),

c - consumo do caminhão transportador (l óleo diesel / km percorrido),

d - distância do aterro ao centro de coleta de resíduos (km),

cap - capacidade do caminhão transportador (ton).

A multiplicação do fator ET pela quantidade de resíduo transportado para o aterro resultará no total de emissões estimadas em um determinado período. Estes valores, para o tempo de abrangência do projeto, encontram-se na tabela 1.

### *Cálculo das emissões de CO<sub>2</sub> resultantes da geração termelétrica*

O projeto prevê a geração termelétrica de 1,8 MW no ano de implantação - 2011, sendo este valor crescente ano a ano, conforme geração de resíduos (ver Balanço de Massa), chegando a 2,8 MW no ano de 2031. Pela utilização do metano oriundo de carbono do ciclo natural, o projeto poderá também reivindicar reduções de emissão, pela transferência das emissões de CO<sub>2</sub> existentes no ponto de conexão ao sistema atribuídas a plantas geradoras que utilizam combustíveis fósseis.

Para estimar as emissões de CO<sub>2</sub> no cenário de linha de base, a metodologia utilizada foi a presente na documentação de concepção do projeto Vale do Rosário Bagasse Cogeneration (ECONERGY, CIA. AÇUCAREIRA VALE DO REAL, 2003 *apud* REICHERT, 2004). Esta metodologia baseia-se no ingresso de energia no sistema a partir do CH<sub>4</sub>, e o consequente deslocamento da quantidade de CO<sub>2</sub> existente na matriz do sistema atribuída a fontes fósseis.

A metodologia atribui ao cenário de linha de base um fator de emissão EF<sub>y</sub>, expresso em tCO<sub>2</sub>/MWh resultado da combinação de fatores de emissão da margem operacional (OM) e da margem de construção (BM). Este fator de emissão EF<sub>y</sub> multiplicado pela energia fornecida ao sistema pelo projeto num determinado período, significa a quantidade em tCO<sub>2</sub> deslocada de outras fontes na matriz do sistema.

Segundo a documentação de concepção do projeto “Vale do Rosário Bagasse Cogeneration” (ECOENERGY, 2003 *apud* REICHERT, 2004), a matriz sul/sudeste/centroeste o cálculo de EF<sub>y</sub>, resulta em um valor de 0,604 tCO<sub>2</sub>/MWh. As emissões totais previstas no cenário de linha de base, demonstrados na Tabela 1 totalizam, em 21 anos, o valor de 4.459.911,23 tCO<sub>2</sub>.

### **Cenário com a Implantação do Sistema de Biodigestão**

Com a implantação desta proposta de projeto, foram atribuídas como emissões, as que ocorrerão em aterro sanitário resultantes da presença de matéria orgânica no material que sai como rejeito dos vários processos do projeto. Para este valor, estimou-se um valor de 4,5 % das emissões originais da linha de base. Ainda como cenário da considerada construção do Complexo, leva-se em conta, o transporte para a disposição em aterro sanitário pela parcela de rejeitos.

Será considerada aqui também, a não necessidade de queima de combustíveis fósseis para geração do potencial de energia elétrica oriundo do CH<sub>4</sub>. Portanto, será descontada anualmente a quantia fornecida se for realizada a implantação do Complexo de Biodigestão Anaeróbia.

As emissões totais previstas no cenário que considera a implantação do projeto são demonstradas na Tabela 2. Estas totalizam, em 21 anos, o valor de 192.429,39 tCO<sub>2</sub>. Deste modo, afirma-se que com o projeto, seriam reduzidas 4.229.420,60 tCO<sub>2</sub>, sendo este valor passível de certificação de redução de emissão de Carbono.

## **RESULTADOS**

As emissões de metano para o cenário de linha de base do Complexo foram estimadas através da Equação (1), obtendo-se os valores apresentados na Tabela 1. Para as estimativas da linha de base, considerou-se que a destinação final dos resíduos será realizada em aterro sanitário distante a 37 km do centro do município. Ainda, tomou-se como base as emissões de CO<sub>2</sub> devido à destinação de resíduos a aterro sanitário, e a não queima de combustíveis fósseis para a geração de energia elétrica. Deste modo, as emissões totais previstas no cenário de linha de base, demonstrados na Tabela 1 totalizam, em 21 anos, o valor de 4.459.911,23 tCO<sub>2</sub>.

Para a menção da implantação do Complexo, considerou-se apenas 4,5 % das emissões originais da linha de base, visto que para esta nova alternativa, apenas o rejeito irá para o aterro. Além disso, ponderou-se a não necessidade de queima de combustíveis fósseis para geração do potencial de energia elétrica oriundo do CH<sub>4</sub>, sendo está descontada anualmente da quantia fornecida. Ainda, considerou-se a redução de transportes, devido ao menor volume de viagens para destinação final. Portanto, As emissões totais previstas no cenário que considera a implantação do projeto são demonstradas na Tabela 2. Estas totalizam, em 21 anos, o valor de 192.429,39 tCO<sub>2</sub>. Deste modo, afirma-se que com o projeto, seriam reduzidas 4.229.420,60 tCO<sub>2</sub>, sendo este valor passível de certificação de redução de emissão de Carbono.



Tabela 1: Cenário de Linha de Base

Ano	Emissões no cenário de linha de base por fonte											Emissões totais no cenário de linha de base
	Resíduos Sólidos					Energia				Transportes		
	Resíduo Gerado	Emissões CH <sub>4</sub>	CH <sub>4</sub> destruído	CH <sub>4</sub> emitido	Emissões Equivalentes em CO <sub>2</sub> (GWP-CH <sub>4</sub> =21)	Potência disponível	Energia despachada (360 dias)	Efy	Emissões de CO2	Resíduo destinado a aterro	Emissões de CO <sub>2</sub>	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
			B*20%	B-C	D*21		F*360*24		G*H		K*0,00571	
	(t/a)	(t/a)	(t/a)	(t/a)	(tCO <sub>2</sub> /ano)	(MW)	(MWh)	(tCO <sub>2</sub> /MWh)	(tCO <sub>2</sub> /ano)	(t/a)	(tCO <sub>2</sub> /ano)	
2011	119.525,31	3.224,96	644,99	2.579,97	54.179,31	1,8	15.552,00	0,604	9.393,41	119.525,31	682,49	64.255,20
2012	123.021,52	4.600,75	920,15	3.680,60	77.292,53	1,8	15.552,00	0,604	9.393,41	123.021,52	702,45	87.388,39
2013	126.517,73	5.843,34	1.168,67	4.674,67	98.168,11	1,9	16.416,00	0,604	9.915,26	126.517,73	722,42	108.805,79
2014	130.013,94	6.968,76	1.393,75	5.575,01	117.075,17	1,9	16.416,00	0,604	9.915,26	130.013,94	742,38	127.732,82
2015	133.510,15	7.991,27	1.598,25	6.393,02	134.253,38	2,0	17.280,00	0,604	10.437,12	133.510,15	762,34	145.452,84
2016	137.006,36	8.923,55	1.784,71	7.138,84	149.915,57	2,0	17.280,00	0,604	10.437,12	137.006,36	782,31	161.135,00
2017	140.502,57	9.776,80	1.955,36	7.821,44	164.250,31	2,1	18.144,00	0,604	10.958,98	140.502,57	802,27	176.011,55
2018	143.998,78	10.560,97	2.112,19	8.448,77	177.424,22	2,1	18.144,00	0,604	10.958,98	143.998,78	822,23	189.205,43
2019	147.494,99	11.284,78	2.256,96	9.027,82	189.584,31	2,2	19.008,00	0,604	11.480,83	147.494,99	842,20	201.907,34
2020	150.991,20	11.955,95	2.391,19	9.564,76	200.859,96	2,2	19.008,00	0,604	11.480,83	150.991,20	862,16	213.202,96
2021	154.487,41	12.581,24	2.516,25	10.065,00	211.364,91	2,3	19.872,00	0,604	12.002,69	154.487,41	882,12	224.249,72
2022	157.983,62	13.166,60	2.633,32	10.533,28	221.198,91	2,3	19.872,00	0,604	12.002,69	157.983,62	902,09	234.103,69
2023	161.479,83	13.717,23	2.743,45	10.973,78	230.449,40	2,4	20.736,00	0,604	12.524,54	161.479,83	922,05	243.895,99
2024	164.976,04	14.237,67	2.847,53	11.390,14	239.192,85	2,4	20.736,00	0,604	12.524,54	164.976,04	942,01	252.659,41
2025	168.472,25	14.731,91	2.946,38	11.785,53	247.496,10	2,5	21.600,00	0,604	13.046,40	168.472,25	961,98	261.504,47
2026	171.968,46	15.203,42	3.040,68	12.162,74	255.417,46	2,5	21.600,00	0,604	13.046,40	171.968,46	981,94	269.445,80
2027	175.464,67	15.655,23	3.131,05	12.524,18	263.007,80	2,6	22.464,00	0,604	13.568,26	175.464,67	1.001,90	277.577,96
2028	178.960,88	16.089,96	3.217,99	12.871,97	270.311,39	2,6	22.464,00	0,604	13.568,26	178.960,88	1.021,87	284.901,51
2029	182.457,09	16.509,93	3.301,99	13.207,94	277.366,76	2,7	23.328,00	0,604	14.090,11	182.457,09	1.041,83	292.498,70
2030	185.953,30	16.917,11	3.383,42	13.533,69	284.207,40	2,7	23.328,00	0,604	14.090,11	185.953,30	1.061,79	299.359,30
2031	189.449,51	17.313,24	3.462,65	13.850,59	290.862,39	2,8	24.192,00	0,604	14.611,97	189.449,51	1.081,76	306.556,12
TOTAIS	3.360.264,71	248.952,70	49.790,54	199.162,16	4.182.405,40	49,50	427.680,00	13,288	258.318,72	3.360.264,71	19.187,11	4.421.849,99

**Tabela 2: Cenário com a implantação do Sistema de Biodigestão**

Ano	Emissões no cenário por fonte									Emissões totais com a implantação do Complexo
	Resíduos Sólidos						Transportes			
	Resíduos Gerados	Resíduos Orgânicos que vão para aterro	Emissões de CH4	CH4 destruído	CH4 emitido	Emissões Equivalentes em CO2 (GWP-CH4=21)	Resíduo gerado	Resíduo destinado a aterro	Emissões de CO2	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
				C*20%	C-D	D*21			K*0,00571	
	(t/a)	(t/a)	(t/a)	(t/a)	(t/a)	(tCO2/ano)	(t/a)	(t/a)	(tCO2/ano)	
2011	119.525,31	5.378,64	145,12	29,02	116,10	2.438,07	119.525,31	35.548,32	202,98	2.641,05
2012	123.021,52	5.535,97	207,03	41,41	165,63	3.478,16	123.021,52	36.584,24	208,90	3.687,06
2013	126.517,73	5.693,30	262,95	52,59	210,36	4.417,57	126.517,73	37.620,17	214,81	4.632,38
2014	130.013,94	5.850,63	313,59	62,72	250,88	5.268,38	130.013,94	38.656,38	220,73	5.489,11
2015	133.510,15	6.007,96	359,61	71,92	287,69	6.041,40	133.510,15	39.692,37	226,64	6.268,05
2016	137.006,36	6.165,29	401,56	80,31	321,25	6.746,20	137.006,36	40.728,25	232,56	6.978,76
2017	140.502,57	6.322,62	439,96	87,99	351,96	7.391,26	140.502,57	41.764,35	238,47	7.629,74
2018	143.998,78	6.479,95	475,24	95,05	380,19	7.984,09	143.998,78	42.800,34	244,39	8.228,48
2019	147.494,99	6.637,27	507,82	101,56	406,25	8.531,29	147.494,99	43.836,33	250,31	8.781,60
2020	150.991,20	6.794,60	538,02	107,60	430,41	9.038,70	150.991,20	44.872,32	256,22	9.294,92
2021	154.487,41	6.951,93	566,16	113,23	452,92	9.511,42	154.487,41	45.908,31	262,14	9.773,56
2022	157.983,62	7.109,26	592,50	118,50	474,00	9.953,95	157.983,62	46.944,30	268,05	10.222,00
2023	161.479,83	7.266,59	617,28	123,46	493,82	10.370,22	161.479,83	47.980,29	273,97	10.644,19
2024	164.976,04	7.423,92	640,70	128,14	512,56	10.763,68	164.976,04	49.016,28	279,88	11.043,56
2025	168.472,25	7.581,25	662,94	132,59	530,35	11.137,32	168.472,25	50.052,27	285,80	11.423,12
2026	171.968,46	7.738,58	684,15	136,83	547,32	11.493,79	171.968,46	51.088,26	291,71	11.785,50
2027	175.464,67	7.895,91	704,49	140,90	563,59	11.835,35	175.464,67	52.124,06	297,63	12.132,98
2028	178.960,88	8.053,24	724,05	144,81	579,24	12.164,01	178.960,88	53.159,98	303,54	12.467,56
2029	182.457,09	8.210,57	742,95	148,59	594,36	12.481,50	182.457,09	54.196,24	309,46	12.790,96
2030	185.953,30	8.367,90	761,27	152,25	609,02	12.789,33	185.953,30	55.232,23	315,38	13.104,71
2031	189.449,51	8.525,23	779,10	155,82	623,28	13.088,81	189.449,51	56.268,22	321,29	13.410,10
TOTAIS	3.360.264,71	151.211,91	11.202,87	2.240,57	8.962,30	188.208,24	3.360.264,71	998.585,90	5.701,93	193.910,17

## ANÁLISE DE VIABILIDADE TÉCNICA, ECONÔMICA E AMBIENTAL

A avaliação da viabilidade econômica será baseada no investimento inicial do projeto e nos custos decorrentes da operação e da manutenção da estrutura, dos equipamentos e dos veículos. O período de retorno do investimento será baseado na quantificação dos benefícios gerados com a venda de recicláveis, energia elétrica, composto orgânico e creditação de certificados de redução de emissões de gases compostos de carbono.

Assim, adotou-se um período de análise de 21 anos (2011 a 2031), considerando que a implantação do Complexo seja realizada em 2010 e a operação seja iniciada em 2011. Adotou-se ainda o ano base de dimensionamento como sendo de 2021 para a capacidade plena da planta, ou seja, para atender toda a demanda crescente do período de 21 anos. Entretanto, aqui não será considerada esta ampliação, deste modo, a capacidade será mantida conforme o ano de 2021 e seus custos e benefícios se manterão constantes.

## ESTIMATIVA DE INVESTIMENTOS E CUSTOS

A implantação do Complexo demandará um investimento inicial aproximado de R\$ 62.300.000,00, conforme Tabela 3. Este custo engloba todos os pré-requisitos para o funcionamento desta planta, desde a aquisição da área necessária para sua implantação, bem como os equipamentos necessários em cada unidade do processo. Com o objetivo de não subestimar custos, adotou-se um acréscimo de 10 % nos custos de implantação como fator de segurança.

**Tabela 3: Custos para a implantação do Complexo de Biodigestão Anaeróbia**

SERVIÇOS	CUSTOS
Aquisição de área para implantação (62.000,00 m²)	R\$ 4.960.000,00
Serviços preliminares (limpeza da área e terraplenagem)	R\$ 47.564,00
Licenciamento (Estadual e Ambiental)	R\$ 5.196.147,80
Unidade de Controle e Pesagem	R\$ 99.608,00
Unidade de Recepção e Triagem	R\$ 5.234.405,00
Unidade de Biodigestão Anaeróbia	R\$ 30.602.650,00
Unidade de Compostagem e Armazenamento	R\$ 9.306.488,00
Unidade de Geração de Energia Elétrica	R\$ 3.685.100,00
Aquisição de equipamentos para o envio do lixiviado para ETL	R\$ 300.000,00
Aquisição de equipamentos para a destinação final dos rejeitos	R\$ 794.800,00
Instalações de apoio	R\$ 1.184.922,50
Elaboração de projeto para creditação de certificados de redução de emissões de gases compostos de carbono	R\$ 250.000,00
Fator de segurança (10 %)	R\$ 56.654.121,30
<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 62.319.533,43</b>

Além dos custos de implantação são considerados para esta análise os custos variáveis, ou seja, de operação e manutenção do empreendimento. Estes foram estimados por ano, e na Tabela 4 estão apresentados os dispêndios referentes ao ano de dimensionamento da planta.

**Tabela 4: Custos para a operação e manutenção do Complexo de Biodigestão Anaeróbia**

SERVIÇOS	CUSTO
Recursos humanos (401 funcionários)	R\$ 7.070.400,00
Custos Administrativos (telefone, água, mat. escritório)	R\$ 707.040,00
Disposição do rejeito em aterro sanitário	R\$ 4.877.265,00
Tratamento do lixiviado em ETL	R\$ 486.940,00
Manutenção da superestrutura (0,5 % a.a. das obras civis)	R\$ 58.271,92
Manutenção dos equipamentos (bombas, prensas, etc.) (2 % a.a.)	R\$ 1.102.177,50
Manutenção dos veículos (5% a.a.)	R\$ 53.500,00
<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 14.355.594,42</b>

## ESTIMATIVA DE BENEFÍCIOS E RECEITAS

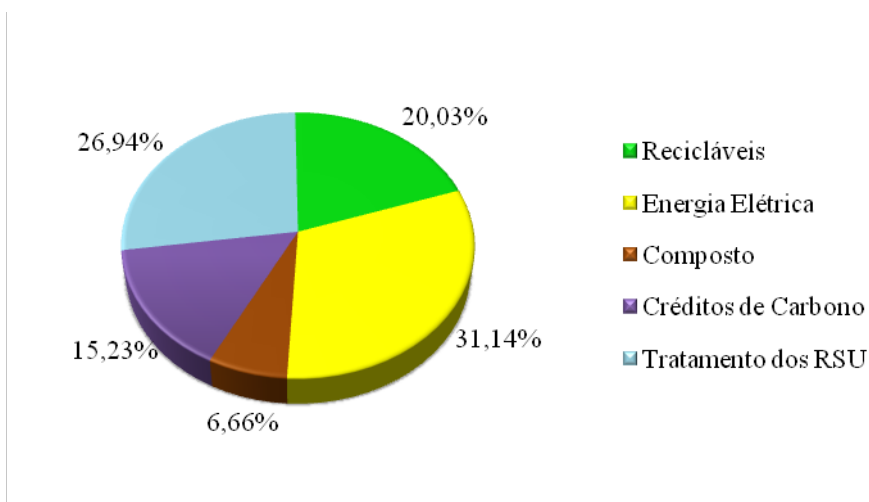
As receitas advindas deste Complexo referem-se à venda de recicláveis, de energia elétrica, de biofertilizante agrícola e da obtenção de créditos de carbono. Estes benefícios foram estimados para a vida útil do projeto considerando como valor de venda o estipulado na Tabela 5, a seguir. Nesta mesma Tabela 5, encontram-se as receitas advindas do Complexo.

**Tabela 5: Receitas advindas do Complexo**

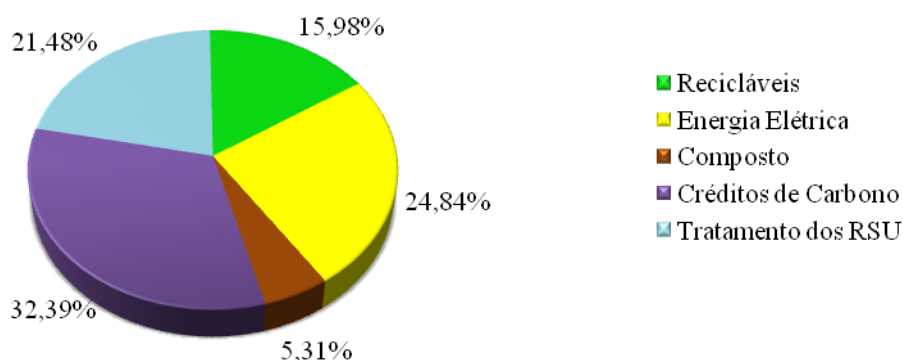
RECEITA	CUSTO
Recicláveis (papel/papelão R\$150,00, plástico R\$250,00, metais R\$200,00, vidro R\$ 30,00)	R\$ 122.089.400,00
Energia elétrica (R\$ 50,00 MWh/a)	R\$ 189.781.910,40
Composto (R\$ 40,00)	R\$ 40.581.640,00
Créditos de Carbono (R\$ 24,64 tCO <sub>2</sub> )	R\$ 92.815.877,24
Tratamento dos RSU	R\$ 164.158.321,87
<b>TOTAL</b>	<b>R\$ 609.427.149,51</b>

Com base nas seguintes informações, faz-se uma análise da viabilidade econômica deste empreendimento, modelando diferentes cenários com base nas possíveis variações econômicas, funcionais e mercadológicas. Além do cenário onde se pondera a venda de créditos de carbono a €9,00 (o que corresponde a R\$ 24,64 na data de outubro de 2008), considerou-se a possibilidade de aumento das receitas obtidas a partir da venda de certificados de redução de emissão de CO<sub>2</sub>, visto que este já atingiu um valor de €25,00 no ano de 2008. Assim, como outra possibilidade, analisa-se a hipótese de aumento deste benefício para €25,00 ou R\$ 68,375 por tCO<sub>2</sub>.

Com a análise das simulações para a implantação deste empreendimento, observa-se a homogeneidade das receitas que dão suporte ao projeto, são estes que lhe darão viabilidade econômica. Os valores constantes na Figura 3 são referentes à hipótese de venda dos créditos de carbono pelo valor de €9,00. Já na Figura 4, os valores referem-se a possibilidade de venda dos créditos de carbono pelo valor de €25,00.



**Figura 3: Participação de diferentes fontes na receita total**



**Figura 4: Participações na receita do Complexo**

Na hipótese de venda dos créditos de carbono por €9,00, este irá configurar numa participação de 15,23 % na receita total da planta. Ao considerar o aumento deste benefício para €25,00, aumenta-se a participação para 32,39 %, evidenciando assim, a importância deste benefício para a viabilidade deste Complexo.

## CONCLUSÕES

O projeto do Complexo de Biodigestão Anaeróbia de Resíduos Sólidos Urbanos para o município de Caxias do Sul propõe o tratamento dos resíduos gerados de forma inovadora, agregando diferentes formas de reaproveitamento e a produção de biogás por DA controlada e geração de energia elétrica. A proposta central desta planta é a redução do material depositado nos aterros sanitários. Entretanto, existem diversos outros benefícios oriundos desta alternativa de gestão, como a inserção deste Complexo como um instrumento de MDL e a apresentação de um projeto viável economicamente.

Além dos benefícios já mencionados, o resultado pautado neste projeto é uma significativa redução nas emissões de gases intensificadores do efeito estufa, comparadas as emissões que ocorreriam na ausência de um projeto desta dimensão. As emissões totais previstas no cenário de linha de base totalizam, em 21 anos, o valor de 4.459.911,23 tCO<sub>2</sub>. Já para a alusão da implantação deste empreendimento, seriam emitidos 192.429,39 tCO<sub>2</sub>. Deste modo, afirma-se que com o projeto, seriam reduzidas 4.229.420,60 tCO<sub>2</sub>, sendo este valor passível de certificação de redução de emissão de Carbono.

Outro proveito da implantação deste projeto é o retorno financeiro que este proporciona, somente ao se considerar a venda de créditos de carbono, arrecada-se em 21 anos o total de o valor obtido pela venda dos créditos de carbono como sendo de R\$ 92.815.877,24. Entretanto ao considerar as demais receitas, este valor é de R\$ 609.427.149,51.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CHERNICHARO, C.A.L. 1997. Reatores anaeróbios. Belo Horizonte: DESA-UFGM.
2. ISAM – INSTITUTO DE SANEAMENTO AMBIENTAL. Caracterização dos resíduos sólidos da cidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul: UCS, 2008.
3. JMalucelli; CMC Ambiental. Conhecimento avançado e expertise no mercado de crédito de carbono. Curitiba, 2008. Disponível em: <[http://www.jmalucelli.com.br/index.php?pag=empresas&t\\_cod=102&subgrupo=jmalucelli\\_e\\_cmc\\_ambiental](http://www.jmalucelli.com.br/index.php?pag=empresas&t_cod=102&subgrupo=jmalucelli_e_cmc_ambiental)> Acesso em: 09 out. 2009.
4. PREFEITURA MUNICIPAL DE CAXIAS DO SUL. Informações. Disponível em <<http://www.caxias.rs.gov.br/>>. Acesso em 15 nov. 2009.
5. SCHNEIDER, V.E. et al. Evolução da geração dos resíduos sólidos urbanos de Caxias do Sul – Análise preliminar. In: 22º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Anais ABES: Joinville, 2003.
6. SINGH, R. 2002. The 1,5 million ton success – biomethanation of MSW by the Valorga process. *Bioenergy News*, V.6, n.4, India

7. TRENTIN, A. C. Complexo de biodigestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos para o município de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 250 p., 2009. Projeto de conclusão de curso para a disciplina de Projetos de Engenharia II - Universidade de Caxias do Sul.
8. TRENTIN, A.C.; REICHERT, G.A. Complexo de biodigestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos para o município de Caxias do Sul: Etapas do processo. In: VII Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, Porto Alegre. Anais.. Porto Alegre: ABES-RS, 2010.
9. TRENTIN, A.C.; REICHERT, G.A. Análise de viabilidade econômica da implantação de um complexo de biodigestão anaeróbia de resíduos sólidos urbanos para o município de Caxias do Sul. In: VII Simpósio Internacional de Qualidade Ambiental, Porto Alegre. Anais.. Porto Alegre: ABES-RS, 2010.
10. REICHERT, G.A. et al. (COORD.). Estudo de viabilidade e sustentabilidade P rojeto Ecoparque: relatório final. Porto Alegre: Convênio DMLU, CGTEE e ELETROBRÁS, 2004.