

# Caderno I

## Modelagem Técnico-Operacional

Atualização dos estudos de viabilidade técnica, econômico-financeira e jurídica para o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos do município de Marília.

*Desenvolvimento:*





## DESCRIÇÃO TÉCNICA

### Caderno I – Modelagem Técnico-operacional

Atualização dos estudos de viabilidade técnica, econômico-financeira e jurídica para o aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos do município de Marília.

Dezembro, 2025

**PREFEITURA MUNICIPAL DE MARÍLIA**  
**SECRETARIA DE MEIO AMBIENTE E SERVIÇOS PÚBLICOS**



## APRESENTAÇÃO

O presente documento consolida e apresenta os resultados da Atualização dos Estudos de Viabilidade Técnica, Econômico-Financeira e Jurídica para o projeto de Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Marília – SP.

Esta atualização foi elaborada em virtude da aprovação do novo Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, revisado pela Lei Municipal nº 9.278/2025, e foi estruturado sob a coordenação da Secretaria de Meio Ambiente e Serviços Públicos da Prefeitura Municipal de Marília.

O estudo tem como objetivo central avaliar a viabilidade de implementação de soluções modernas e sustentáveis para o manejo dos resíduos sólidos, alinhadas às diretrizes estabelecidas no plano municipal e na Política Nacional de Resíduos Sólidos (Lei nº 12.305/2010).

Este estudo constitui documento preliminar e parâmetros poderão ser refinados na fase competitiva de consulta pública e audiência, mediante contribuições do mercado e atualização das bases de dados operacionais

A elaboração deste relatório envolveu a coleta e análise de dados primários e secundários, a avaliação de aspectos técnicos e operacionais, a modelagem econômico-financeira e a análise da conformidade jurídica do projeto, sempre em conformidade com o marco legal aplicável.

Os resultados aqui expostos refletem um esforço técnico multidisciplinar e representam um instrumento fundamental para a tomada de decisão pela Administração Pública, orientando os próximos passos para a potencial implementação de um projeto de aproveitamento energético que posicione Marília como referência em gestão sustentável de resíduos.



## CONSIDERAÇÕES PRELIMINARES

**CONSIDERANDO** o Ofício encaminhado pela Secretaria de Meio Ambiente e Serviços Públicos de Marília 001/2025, de 31 de Janeiro de 2025 convocando a WBIO a atualizar os estudos apresentados no processo de manifestação de interesse (PMI) SMALP 001/2017, cujo objeto foi homologado e publicado no diário oficial do município de Marília na data de 14 de Junho de 2018, os quais instruíram o Edital 009/2018.

**CONSIDERANDO** que referida atualização e eventual indicação de novas tecnologias acompanhadas das devidas informações pertinentes e eventuais ajustes necessários nos documentos previamente aprovados.

**CONSIDERANDO** a necessidade de atualização do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Marília;

**CONSIDERANDO** a aprovação do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Marília, o qual foi revisado e aprovado pela Lei 9.278, de 26 de Junho de 2025.

**CONSIDERANDO** as disposições sobre valorização energética, inclusão social e metas de redução de aterro devem estar alinhadas às metas e diretrizes no novo Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Marília.

**CONSIDERANDO** que este Caderno I deve destacar que Modelagem Técnico-Operacional dá efetividade ao Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Marília revisado em atendimento ao artigo 1º da Lei 9.278, de 26 de Junho de 2025.

**CONSIDERANDO** que a integração do Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Marília, revisado e aprovado pela Lei 9.278, de 26 de Junho de 2025, à Política Nacional de Resíduos Sólidos – Lei 12.305/2010, à Política Estadual – Lei 12.300/2006 e às Normas CONAMA, as quais respaldam juridicamente à adoção de Parceria Público Privada para tratamento e recuperação energética das frações secas e úmidas (orgânicas) dos Resíduos Sólidos Domésticos de Marília.



## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO .....	11
2.	CONTEXTUALIZAÇÃO DOS PROJETOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS .....	12
3.	POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	13
3.1.	PRIORIDADE DOS RESÍDUOS SÓLIDOS .....	14
3.2.	PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS BRASIL.....	15
3.3.	GRAVIMETRIA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS DO MUNICÍPIO DE MARÍLIA ...	16
4.	PROJEÇÃO POPULACIONAL E GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS.....	17
4.1.	INTRODUÇÃO .....	17
4.2.	DADOS DE PARTIDA.....	18
4.3.	METODOLOGIAS DE PROJEÇÃO UTILIZADAS .....	18
4.3.1.	MÉTODO 1: CRESCIMENTO GEOMÉTRICO (OU EXPONENCIAL) .....	18
4.3.2.	MÉTODO 2: PROJEÇÃO POR REGRESSÃO LINEAR (EM ESCALA LOGARÍTMICA).....	18
4.3.3.	APLICAÇÃO DOS MÉTODOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	19
4.4.	ESCOLHA DO MÉTODO E CENÁRIO DE TRABALHO .....	19
4.5.	PROJEÇÃO DA GERAÇÃO FUTURA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES (RSD).....	20
5.	RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA – TECNOLOGIAS .....	20
5.1.	BIODIGESTÃO ANAERÓBIA – UTILIZAÇÃO DA FRAÇÃO ORGÂNICA (ÚMIDA) .....	21
5.1.1.	FUNDAMENTOS DO PROCESSO E TECNOLOGIAS .....	22
5.1.2.	PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE BIODIGESTÃO .....	22
5.1.3.	ESTÁGIO DA TECNOLOGIA NO MUNDO.....	22
5.1.4.	ESTÁGIO DA TECNOLOGIA NO BRASIL .....	23
5.1.5.	VANTAGENS E APLICAÇÕES DO BIOGÁS .....	24
5.2.	TECNOLOGIAS PARA CONVERSÃO TERMOQUÍMICA.....	24
5.3.	GASEIFICAÇÃO.....	24
5.4.	PIRÓLISE.....	25
5.5.	MASS BURNING.....	25
5.6.	Comparação Resumida das Tecnologias .....	26
5.7.	Aplicação Industrial e Tendências Atuais .....	27
5.8.	DIFERENÇA ENTRE AS TECNOLOGIAS .....	28
5.9.	VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS TECNOLOGIAS .....	29
5.10.	TABELA DE COMPARAÇÃO DAS TECNOLOGIAS PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RSU	30
6.	SÍNTESE DA PROPOSTA .....	32
6.1.	LOCALIZAÇÃO DA USINA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS .....	33
6.2.	OBJETIVO DO EMPREENDIMENTO .....	33
6.3.	USINA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA- URE .....	34
6.4.	PROCESSOS – RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS .....	35
6.4.1.	TRATAMENTO TÉRMICO GASEIFICAÇÃO– UTILIZAÇÃO DA FRAÇÃO SECA .....	37
6.4.2.	TRATAMENTO TÉRMICO PIRÓLISE– UTILIZAÇÃO DA FRAÇÃO SECA .....	49
6.4.3.	BIODIGESTÃO – UTILIZAÇÃO DA FRAÇÃO ORGÂNICA.....	53
6.4.4.	UPGRADING DE BIOGÁS PARA BIOMETANO .....	58
6.4.5.	UPGRADING DE BIOGÁS PARA DE CO <sub>2</sub> .....	59
6.5.	CRONOGRAMA DE IMPLANTAÇÃO .....	60
6.5.1.	CONTRATO (MÊS 1) .....	61
6.5.2.	LICENCIAMENTO .....	61
6.5.3.	BIODIGESTÃO.....	61



6.5.4.	GASEIFICAÇÃO/PIRÓLISE .....	62
6.5.5.	METAS DE REDUÇÃO DE ENVIO PARA ATERRO .....	62
6.5.6.	ANÁLISE DO CRONOGRAMA .....	63
7.	NOVO MODELO DE GESTÃO DOS RESÍDUOS PROPOSTO .....	63
7.1.	VANTAGENS DO NOVO MODELO PROPOSTO .....	67
7.1.1.	VANTAGENS ECONÔMICAS .....	67
7.1.2.	VANTAGENS SOCIAIS .....	69
7.1.3.	VANTAGENS AMBIENTAIS .....	70
7.1.4.	VANTAGENS OPERACIONAIS .....	71
7.1.5.	VANTAGENS DA EFICIÊNCIA NO EMPREGO DE RECURSOS PÚBLICOS .....	71
7.2.	BALANÇA DE MASSA EMPREENDIMENTO .....	72
7.3.	PREMISSAS TÉCNICAS E BALANÇO ENERGÉTICO .....	74
7.3.1.	CARACTERÍSTICAS DO COMBUSTÍVEL (RSU/CDR) .....	74
7.3.2.	EFICIÊNCIAS DOS PROCESSOS .....	74
7.3.3.	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PROJETADA .....	75
7.4.	FLEXIBILIDADE TECNOLÓGICA E INOVAÇÃO .....	75
8.	INVESTIMENTOS .....	76
8.1.	GALPÃO INDUSTRIAL .....	78
8.2.	SISTEMA DE TRITURAÇÃO E SEGREGAÇÃO DE RSU .....	78
8.3.	SISTEMA DE GASEIFICAÇÃO OU PIRÓLISE .....	78
8.4.	SISTEMA DE BIODIGESTÃO .....	78
8.5.	SISTEMA DE UPGRADING PARA BIOMETANO .....	78
8.6.	SISTEMA DE COMPRESSÃO E ABASTECIMENTO .....	79
8.7.	SISTEMA DE UPGRADING PARA CO2 .....	79
9.	VIDA ÚTIL DO EMPREENDIMENTO E ESTRATÉGIA DE INVESTIMENTO .....	79
9.1.	VIDA ÚTIL DOS PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS .....	79
9.1.1.	GESTÃO DO CICLO DE VIDA NO ÂMBITO DA CONCESSÃO DE 30 ANOS .....	81
9.2.	ESTRATÉGIA DE REINVESTIMENTO E MODERNIZAÇÃO .....	82
10.	RESULTADOS E INDICADORES ESPERADOS COM A IMPLANTAÇÃO DA URE MARÍLIA .....	83
10.1.	INDICADORES DE EFICIÊNCIA NA GESTÃO DE RESÍDUOS .....	83
10.2.	INDICADORES DE PRODUÇÃO ENERGÉTICA E SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS .....	83
10.3.	INDICADORES DE GANHOS AMBIENTAIS E REDUÇÃO DE EMISSÕES .....	84



## RESUMO EXECUTIVO

Atualização dos Estudos de Viabilidade Técnica, Econômico-Financeira e Jurídica para o Aproveitamento Energético de Resíduos Sólidos Urbanos do Município de Marília

Dezembro de 2025

### 1. CONTEXTO E OBJETIVO

O Município de Marília, atendendo ao novo Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos (Lei nº 9.278/2025) e à Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS - Lei nº 12.305/2010), promoveu a atualização dos estudos de viabilidade para implantação de um sistema moderno e sustentável de aproveitamento energético de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU).

O objetivo central é cumprir integralmente a hierarquia de gestão de resíduos estabelecida pela PNRS, implementando uma solução que priorize:

- a) A Reciclagem dos materiais secos passíveis de beneficiamento (metais, vidros).
- b) A Valorização Energética das frações orgânica e seca de alto poder calorífico.
- c) A Destinação Final Ambientalmente Adequada, encaminhando para o aterro sanitário apenas os rejeitos que não possuem viabilidade técnica e/ou econômica de recuperação.

Este modelo visa transformar um passivo ambiental e financeiro em um ciclo de economia circular, gerando energia renovável, receitas alternativas, mitigando emissões de gases de efeito estufa (GEE) e posicionando Marília como referência em gestão pública sustentável.

### 2. DIAGNÓSTICO DA GERAÇÃO DE RESÍDUOS

- Geração Atual (2024): 200 toneladas/dia de Resíduos Sólidos Domiciliares (RSD), equivalente a 62.400 toneladas/ano.
- Composição Gravimétrica (FORSU - Fração Orgânica de Resíduos Sólidos Urbanos):
  - Fração Orgânica (Úmida): 45% (90 ton/dia)
  - Fração Seca (Alto poder calorífico): 34% (68 ton/dia)
  - Metais e Vidros: 5% (10 ton/dia)
  - Rejeitos: 16% (32 ton/dia)



- Projeção Futura (2059): Considerando crescimento populacional conservador (0,77% a.a.), a geração projetada é de 261 toneladas/dia, reforçando a necessidade de um sistema robusto e escalável.

### **3. SOLUÇÃO TÉCNICA PROPOSTA: USINA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA (URE MARÍLIA)**

Propõe-se a implantação de uma Usina de Recuperação Energética (URE) sob o modelo de Parceria Público-Privada (PPP), com um desenho flexível e orientado a resultados. O edital concederá liberdade tecnológica ao concessionário, que poderá, a seu critério e com base em sua expertise, escolher implantar as tecnologias de forma parcial ou total, desde que atinja as metas contratuais de redução de envio de RSU para o aterro sanitário.

Tecnologias Elegíveis e Modelo de Negócio Flexível:

a) BIODIGESTÃO ANAERÓBIA (para a FORSU):

- Tecnologia biológica para conversão da matéria orgânica (90 ton/dia) em biogás.
- O biogás pode ser purificado (*upgrading*) para produção de Biometano (BioGNV) e CO<sub>2</sub> de Alta Pureza, ambos com valor de mercado.

b) RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DA FRAÇÃO SECA – TRATAMENTO TÉRMICO:

- Tecnologias termoquímicas como Gaseificação ou Pirólise para conversão dos materiais de alto poder calorífico (68 ton/dia) em gás de síntese (syngas).
- O syngas será utilizado para geração de energia elétrica (capacidade estimada de 2,5 MW) e/ou outros vetores energéticos.

Cada proponente (concessionário) terá a liberdade de criar seu próprio modelo de aproveitamento energético, podendo optar por:

- Implantar apenas a Biodigestão (tratando 45% dos resíduos).
- Implantar apenas a Gaseificação ou Pirólise (tratando 34% dos resíduos).
- Implantar o modelo integrado (Biodigestão + Gaseificação ou Pirólise), tratando até 79% dos resíduos e maximizando a produção de energia e subprodutos.

O foco contratual será o menor preço, porém com meta de desempenho (redução do volume aterrado), e não a imposição de uma tecnologia específica. Após a triagem mecânica, os



materiais recicláveis (metais, vidros) serão destinados à cadeia da reciclagem e após o aproveitamento energético, apenas os rejeitos (16%) serão encaminhados para disposição final em aterro sanitário, em plena conformidade com a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

#### **4. PRINCIPAIS RESULTADOS E IMPACTOS ESPERADOS**

##### **4.1. Eficiência na Gestão de Resíduos**

- Meta de Redução para envio de resíduo para aterro sanitário: Mínimo de 45% do volume atual, desviando ~28.170 ton/ano.
- Conformidade Legal: Alinhamento total com a hierarquia da PNRS.

##### **4.2. Produção Energética e Geração de Receita**

- Biometano: Potencial de ~1,6 milhões Nm<sup>3</sup>/ano (substitui ~1,6 milhões de litros de diesel).
- Energia Elétrica: Até 2,5 MW de capacidade instalada.
- CO<sub>2</sub> Purificado: ~1,5 milhões ton/ano para comercialização.
- Receitas: Venda de energia, biometano, CO<sub>2</sub> e créditos de carbono.

##### **4.3. Impacto Econômico-Financeiro**

- Economia Municipal: Redução de custos com aterro de R\$ 5,27 milhões/ano no cenário integrado (economia acumulada de R\$ 158 milhões em 30 anos).
- Investimento Privado: R\$ 46,5 mi a R\$ 101,5 mi (dependendo do escopo), sem custo inicial para o município.
- Empregos: 80 diretos e 240 indiretos.

##### **4.4. Benefícios Ambientais e Sociais**

- Redução de GEE: Evita ~48.300 ton de CO<sub>2</sub> equivalente/ano.
- Redução de Poluição: Minimiza chorume e riscos ambientais.
- Sustentabilidade: Economia circular e segurança energética local.

#### **5. MODELO DE CONTRATAÇÃO E CRONOGRAMA**



- Modelo: PPP/Concessão com foco em resultados e flexibilidade tecnológica.
- Implantação Gradual: Metas de redução de 45% (15 meses) e com 79% (30 meses), caso tenha a BIODIGESTÃO ANAERÓBIA + TRATAMENTO TÉRMICO.

## 6. INVESTIMENTOS ESTIMADOS E MODELO DE FINANCIAMENTO

Todo o investimento de capital (CAPEX) será de responsabilidade da concessionária privada vencedora, sem qualquer aporte inicial do erário municipal. Os valores totais estimados, que incluem todos os sistemas, licenciamento, projetos de engenharia e infraestrutura de apoio, variam conforme o escopo tecnológico escolhido pelo proponente:

- **Cenário com Implantação da Biodigestão:** Estimado um total de R\$ 46.500.000,00 (QUARENTA E SEIS MILHÕES E QUINHENTOS MIL REAIS).
- **Cenário com Implantação do Tratamento Térmico:** Estimado um total de R\$ 55.000.000,00 (CINQUENTA E CINCO MILHÕES DE REAIS).
- **Cenário com Biodigestão + Tratamento Térmico:** Estimado um total de R\$ 101.5000,00 (CENTO E UM MILHÕES E QUINHENTOS MIL REAIS)

O modelo de PPP assegura a transferência de risco tecnológico e de construção para o parceiro privado. A contraprestação pública será vinculada à entrega dos serviços e ao cumprimento das metas operacionais, garantindo a sustentabilidade do projeto ao longo do prazo da concessão, que inclui previsões para reinvestimento em modernização e reposição de equipamentos.

## 7. CONCLUSÃO

A URE MARÍLIA é um projeto estratégico que alia conformidade legal (PNRS), inovação tecnológica flexível e sustentabilidade financeira. Ao transferir o risco tecnológico e de investimento para a iniciativa privada, focando em metas de desempenho, o município garante a modernização da gestão de resíduos, a geração de benefícios ambientais e econômicos e o cumprimento de seu papel na promoção da economia circular. O modelo proposto é robusto, viável e recomendado para implementação imediata.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil vem apresentando ao longo dos últimos anos uma conscientização e preocupação com a sustentabilidade ambiental relevantes. As questões de saneamento e saúde ocupam hoje um patamar elevado na consciência da população brasileira e consequentemente de seus representantes políticos, no executivo e legislativo, se materializando nas recentes legislações, com destaque para a Política Nacional de Saneamento Básico (Lei nº 11.445/07) e a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (Lei nº 12.305/10).

A partir desse novo cenário, os municípios têm a importante missão social de transformar suas práticas ambientais, e o prefeito é o principal agente dessa mudança, com a oportunidade de elevar sua cidade a novos patamares na gestão de resíduos e com diversas obrigações a serem cumpridas.

A gestão de resíduos sólidos é um crescente desafio para a sociedade atual, especialmente para a administração pública, em razão da quantidade e da diversidade de resíduos, do crescimento populacional e do consumo, da expansão de áreas urbanas e da cultura histórica de aplicação de recursos insuficientes para a gestão adequada de resíduos ambientalmente.

A população brasileira cresceu 12% nos últimos dez anos (IBGE, 2010), e a produção de resíduos, no mesmo período, cresceu 90%. Segundo a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais - ABRELPE, a geração per capita cresceu 5,3% entre 2009 e 2010 no Brasil.

No entanto, um estudo recente realizado pela PwC, pelo Sindicato das Empresas de Limpeza Urbana no Estado de São Paulo - SELUR e pela Associação Brasileira de Resíduos Sólidos e Limpeza Pública - ABLP demonstrou que o valor aplicado em gestão de resíduos no Brasil por habitante/ano é de R\$ 88,01. Isso explica os baixos níveis de investimento e consequentemente a incorreta forma de destinação observada na maioria dos municípios.

Em um cenário de escassez de recursos, é desafiador atingir e manter a qualidade e a inovação tecnológica desejadas aos serviços de limpeza urbana, principalmente quando se pensa em uma visão de longo prazo.

De acordo com o Dicionário de Aurélio Buarque de Holanda, "lixo é tudo aquilo que não se quer mais e se joga fora; coisas inúteis, velhas e sem valor." Já a Associação Brasileira de Normas Técnicas - ABNT define o lixo como os "restos das atividades humanas, considerados pelos geradores como inúteis, indesejáveis ou descartáveis, podendo-se apresentar no estado sólido, semissólido ou líquido, desde que não seja passível de tratamento convencional."



Resíduo sólido ou simplesmente "lixo" é todo material sólido ou semi-sólido indesejável e que necessita ser removido por ter sido considerado inútil por quem o descarta, em qualquer recipiente destinado a este ato.

Mas também há de se destacar, que aquilo que já não apresenta nenhuma serventia para quem o descarta, para outro pode se tornar matéria-prima para um novo produto ou processo.

Nesse sentido, a ideia do reaproveitamento/transformação do lixo é um convite à reflexão do próprio conceito clássico de resíduos sólidos. É como se o lixo pudesse ser conceituado como tal, somente quando da inexistência de alguém para destinar a uma nova utilização além do clássico envio aos aterros sanitários.

Vivemos numa sociedade organizada e que estimula o consumo e a produção em grande escala e cuja capacidade de deposição dos resíduos em aterros sanitários se encontra próxima dos limites. A filosofia do descartável e do excesso de embalagens predomina em diversos setores do mercado o que significa diretamente mais rejeitos.

De acordo com a Lei Municipal nº 9.278, de 26 de junho de 2025, que aprovou a revisão do Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos Urbanos, o Município de Marília possui contrato com a empresa Revita Engenharia S.A. para a destinação final dos resíduos coletados. O volume estimado é de 6.000 (SEIS MIL) toneladas por mês, o que equivale a 72.000 (SETENTA E DUAS MIL) toneladas por ano.

Para fins de cálculo deste estudo de modelagem técnico-operacional, adotou-se como base um quantitativo de 5.200 (CINCO MIL E DUZENTAS) toneladas mensais de resíduos sólidos domiciliares.

Problemas sérios causados pela precária disposição final do lixo como a disseminação de doenças, a contaminação do solo e de águas subterrâneas pelo chorume, a poluição pelo gás metano (gerado na decomposição da matéria orgânica presente no lixo), a falta de espaço para o armazenamento, a indisponibilidade de novas áreas licenciadas para abertura de novos aterros baseados nas novas diretrizes da lei nº 12.305, de agosto de 2010 – Política Nacional de Resíduos Sólidos confirmam a necessidade de alternativas eficazes e efetivas contra este cenário atual.

## 2. CONTEXTUALIZAÇÃO DOS PROJETOS DE RESÍDUOS SÓLIDOS

O setor de resíduos sólidos no Brasil ainda enfrenta obstáculos significativos para alcançar a universalização e a gestão ambientalmente adequada. A aprovação do novo marco legal do saneamento básico, que trouxe alterações na Lei nº 11.445/2007 (Lei Nacional do Saneamento Básico) e na Lei nº 12.305/2010 (Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS), impulsionou

estados e municípios a buscarem maior alinhamento às metas legais e às diretrizes do Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares).

Conforme o “Guia prático de estruturação de projetos de concessão de manejo sustentável de resíduos sólidos urbanos”, elaborado pelo Programa de Parcerias de Investimentos – PPI, os Serviços de Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos (SMRSU) abrangem desde a coleta até a destinação final ambientalmente adequada. Apesar dos avanços regulatórios mais recentes, grande parte dos municípios ainda encontra dificuldades em se adequar plenamente.

### **Panorama atual**

- 89,9% da população é atendida com coleta domiciliar;
- 32% dos municípios possuem coleta seletiva estruturada;
- 26,8% da massa de resíduos gerada ainda é destinada a locais ambientalmente inadequados (lixões e aterros controlados), que somam 2.167 unidades;
- Apenas 42,1% dos municípios realizam cobrança pelos serviços de manejo, e a arrecadação cobre em média 55% dos custos operacionais.

### **Metas do Planares**

As metas nacionais estabelecidas pelo Planares reforçam o caráter desafiador do setor:

- Universalizar a coleta regular de RSU até 2036;
- Assegurar que 72,6% da população tenha acesso à coleta seletiva até 2040;
- Encerrar todos os lixões e aterros controlados até 2024;
- Garantir que, até 2024, 100% dos municípios adotem mecanismos de cobrança pela prestação dos serviços de manejo de resíduos sólidos urbanos.

## **3. POLÍTICA NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS**

Em 2010 foi instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), através da Lei no 12.305/2010, que reúne o conjunto de princípios, objetivos, instrumentos, diretrizes, metas e ações adotadas pelo Governo Federal, com vistas à gestão integrada e ao gerenciamento ambientalmente adequado dos resíduos sólidos.

A PNRS, em seu art. 3º, inc. XVI, define resíduos sólidos como:

*[...] material, substância, objeto ou bem descartados resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidade tornem inviável o seu lançamento na rede pública e esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível.*

A Lei 12.305/2010 que instituiu no país a Política Nacional de Resíduos Sólidos estabeleceu princípios e objetivos que podem contribuir decisivamente para uma gestão correta e integrada dos diversos tipos de resíduos gerados, possibilitando aos agentes envolvidos contribuírem para o desenvolvimento sustentável, a preservação dos recursos naturais e a afirmação da cidadania.

A visão sistêmica precisa considerar as variáveis ambientais, econômicas, tecnológicas e de saúde pública, sendo a prevenção e a precaução fundamentais.

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei 12.305/2010 Art. 3º Inciso VII, destinação final ambientalmente adequada é "destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do Sisnama, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos".

A destinação final ambientalmente adequada de resíduos sólidos engloba o conjunto de processos que, seguindo o conceito da ordem de prioridade na gestão e gerenciamento de resíduos definidos pelo artigo 9º da Lei 12.305/2010, vão desde a reutilização até a disposição final ambientalmente adequada de rejeitos.

O Art. 9º dessa mesma Lei define a ordem de prioridade na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos de acordo com a figura abaixo:

### 3.1. PRIORIDADE DOS RESÍDUOS SÓLIDOS

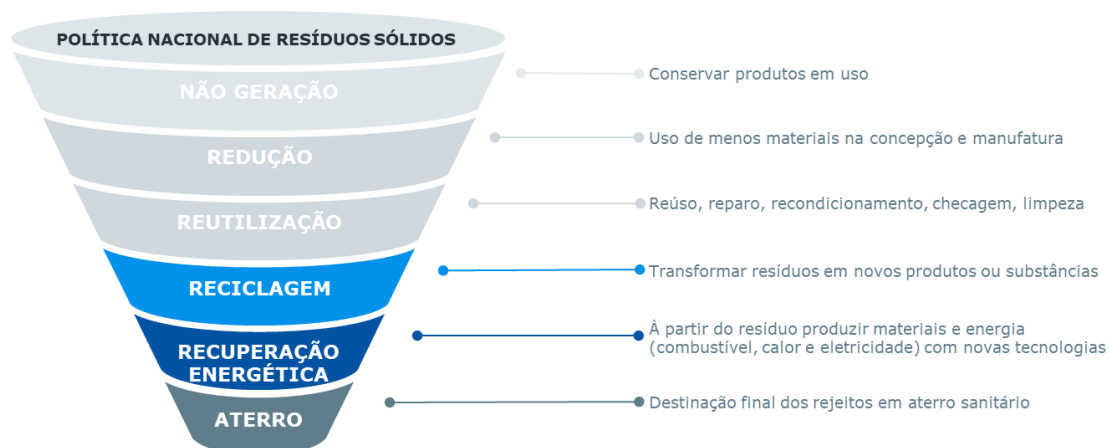


Figura 1 – Prioridade dos resíduos sólidos

Acertadamente, o Brasil fixou em lei a ordem de prioridade para destinação de resíduos, priorizando a reutilização e reciclagem e deixando por último a disposição em aterro sanitário, ou seja, só deverão ser encaminhados para aterro sanitários rejeitos que não podem ser aproveitados anteriormente.

O termo “Recuperação Energética” é utilizado para denominar os métodos e processos industriais que permitem recuperar parte da energia contida nos resíduos sólidos.

A depender de onde e como são geradas, as características do RSD variam (composição, poder calorífico, umidade, etc.), o que influencia diretamente na eficiência do sistema de recuperação energética.

A possibilidade de recuperação energética dos Resíduos Sólidos Domiciliares - RSD não é conflitante com o objetivo de aumentar significativamente a reutilização e a reciclagem. São alternativas complementares para reduzir ou zerar a quantidade de rejeitos disposta em aterros sanitários.

A recuperação energética de resíduos deve ser entendida como uma atividade de destinação/tratamento de resíduos, e não como uma atividade de geração de energia. Devem prevalecer os objetivos de proteção ambiental. A energia obtida deve ser entendida como similar a um produto de reciclagem, que poupa outras fontes e contribui para a economicidade da correta destinação de resíduos.

### 3.2. PANORAMA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS BRASIL

A gravimetria Nacional foi divulgada na edição 2020 do Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil realizada pela ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. De acordo com estudo, nota-se que a fração orgânica, abrangendo sobras e perdas de alimentos, resíduos verdes e madeiras, é a principal componente dos RSU, com 45,3%. Os resíduos recicláveis secos somam 33,6%, sendo compostos principalmente pelos plásticos (16,8%), papel e papelão (10,4%), vidros (2,7%), metais (2,3%), e embalagens multicamadas (1,4%). Outros resíduos somam 21,1%, dentre os quais resíduos têxteis, couros e borrachas representam 5,6% e rejeitos, estes compostos principalmente por resíduos sanitários, somam 15,5%. A gravimetria nacional foi estimada com base na média ponderada a partir da geração total de RSU por faixa de renda dos municípios e respectivas composições, levando-se em consideração a população e geração per capita ([abrelpe.org.br](http://abrelpe.org.br)).

A gravimetria assumida possui caráter projetual para a viabilidade inicial, pois em sua fase de estruturação (estudos de viabilidade, edital, modelagem econômico-financeira), precisa de parâmetros técnicos para dimensionar a usina, a tecnologia e/ou a capacidade de geração de

energia. Sem dados locais, a gravimetria nacional serve como proxy técnico ou dado de entrada padrão para iniciar os cálculos.

A intenção, nesta fase, não é ter precisão absoluta, mas estimar uma faixa de viabilidade. A gravimetria média permite testar se, mesmo em um cenário conservador (composição "genérica"), o projeto pode ser financeiramente e tecnicamente sustentável.

O uso da gravimetria média nacional na fase de estruturação de um projeto de concessão para aproveitamento energético é uma prática aceitável e pragmática, que serve como base inicial para modelagem, desde que o contrato preveja, de forma explícita e robusta, mecanismos de verificação e reequilíbrio econômico-financeiro com base na caracterização real dos resíduos que efetivamente chegarem à usina.

Os valores gravimétricos aqui utilizados possuem caráter estimativo e serão obrigatoriamente verificados em campanha gravimétrica de 3 estações (seca, chuvosa, intermediária), a ser executada pela concessionária vencedora antes da assinatura do contrato.

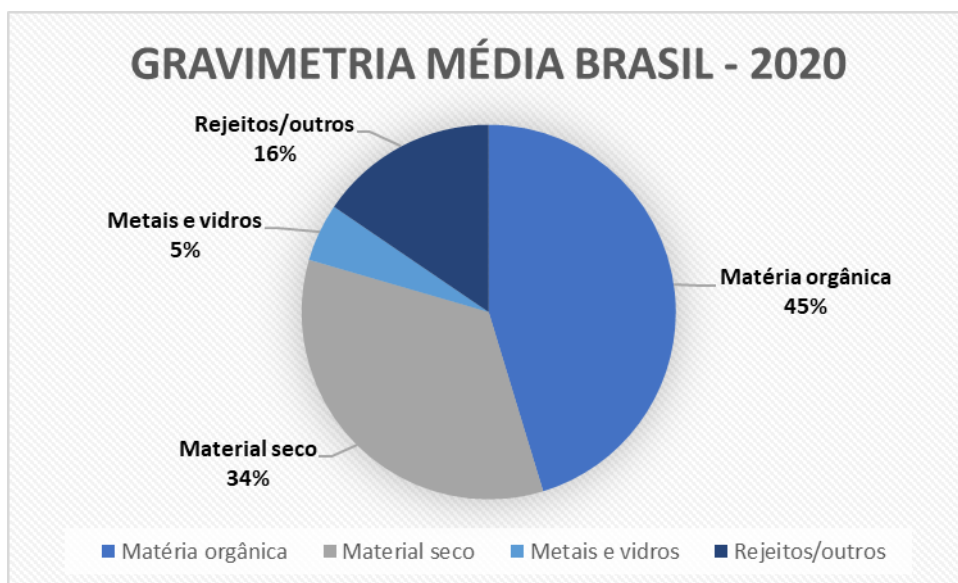


Figura 2: Gravimetria Média do Brasil – 2020

- i) Fração orgânica: 45%
- ii) Fração seca: 34%
- iii) Rejeitos não utilizados nos processos: 21%

### 3.3. GRAVIMETRIA DOS RESÍDUOS SÓLIDOS DOMÉSTICOS DO MUNICÍPIO DE MARÍLIA

De acordo com a Lei Municipal nº 9.278, de 26 de junho de 2025, que aprovou a revisão do Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, o Município de Marília possui contrato com a



empresa Revita Engenharia S.A. para a destinação final dos resíduos coletados. O volume estimado é de 6.000 (SEIS MIL) toneladas por mês, o que equivale a 72.000 (SETENTA E DUAS MIL) toneladas por ano. Porém a municipalidade atualizou o volume de geração para 62.400 (SESSENTA E DUAS MIL E QUATROCENTAS) toneladas por ano.

Para fins de cálculo deste estudo de modelagem técnico-operacional, adotou-se como base um quantitativo de 5.200 (CINCO MIL E DUZENTAS) toneladas mensais de resíduos sólidos domiciliares e com a operação de 26 (VINTE SEIS) dias de operação por mês, resultando no quantitativo diário de 200 (DUZENTAS) toneladas por dia de resíduos sólidos domésticos – RSD.

A população estimada para o Município de Marília em 2024, conforme IBGE foi de 246.627 (DUZENTOS E QUARENTA E SEIS MIL, SEISCENTOS E VINTE E SETE) habitantes (<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/marilia.html>), o que representa uma geração per capita de 0, 811 (OITOCENTOS E ONZE) kg/habitante/dia.

Com tais premissas a gravimetria estimada para o Município de Marília é:

- i) Fração orgânica (úmida): 45%
- ii) Fração seca: 34%
- iii) Metais e Vidros: 5%
- iv) Rejeitos: 16%

O quantitativo em toneladas por dia de resíduos sólidos domésticos é:

- i) Fração orgânica (úmida): 90 (NOVENTA) toneladas por dia
- ii) Fração seca: 68 (SESSENTA E OITO) toneladas por dia
- iii) Metais e Vidros: 10 (DEZ) toneladas por dia
- iv) Rejeitos: 32 (TRINTA E DUAS) toneladas por dia

## 4. PROJEÇÃO POPULACIONAL E GERAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

### 4.1. INTRODUÇÃO

O planejamento de sistemas de gestão de resíduos sólidos, especialmente de empreendimentos de recuperação energética com vida útil de décadas, requer uma projeção robusta e confiável da população atendida. Este capítulo apresenta a projeção da população do município de Marília-SP para os próximos 35 anos (até 2059), utilizando metodologias consagradas pela demografia.

A partir dessa projeção, é possível estimar a futura geração de resíduos sólidos domiciliares (RSD), fundamental para dimensionar a capacidade necessária do sistema de tratamento.

## 4.2. DADOS DE PARTIDA

- População Base (2024): 246.627 habitantes (Fonte: IBGE, 2024)
- Taxa de Crescimento Populacional de Marília (2010-2022):  $\approx 0,87\%$  ao ano (Fonte: Elaborado a partir de dados do IBGE).
- Taxa de Crescimento do Estado de São Paulo (projeção ONU/IBGE):  $\approx 0,77\%$  ao ano (utilizada como referência regional conservadora).

## 4.3. METODOLOGIAS DE PROJEÇÃO UTILIZADAS

Para garantir robustez à análise, foram aplicados dois métodos de projeção populacional:

### 4.3.1. MÉTODO 1: CRESCIMENTO GEOMÉTRICO (OU EXPONENCIAL)

Este método assume uma taxa de crescimento constante ( $r$ ) ao longo do tempo. É representado pela fórmula:

$$P(t) = P_0 * (1 + r)^t$$

Onde:

- $P(t)$  = População no ano futuro ( $t$ )
- $P_0$  = População no ano base (246.627 hab.)
- $R$  = Taxa de crescimento anual (decimal)
- $T$  = Número de anos no futuro

### 4.3.2. MÉTODO 2: PROJEÇÃO POR REGRESSÃO LINEAR (EM ESCALA LOGARÍTMICA)

Este método, muitas vezes mais preciso para médio e longo prazos, aplica uma regressão linear sobre o logaritmo natural da população, suavizando a curva de crescimento. A fórmula deriva da linearização da fórmula exponencial:

$$\ln(P(t)) = \ln(P_0) + t * \ln(1+r)$$

A projeção é feita calculando a população para cada ano usando a taxa derivada da tendência histórica.

### 4.3.3. APLICAÇÃO DOS MÉTODOS E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Foram testadas duas taxas de crescimento para os métodos:

1. Taxa Municipal (0,87% a.a.): Baseada no crescimento histórico recente de Marília.
2. Taxa Regional (0,77% a.a.): Uma taxa mais conservadora, alinhada à tendência de desaceleração do crescimento populacional no Estado de São Paulo.

A tabela abaixo apresenta os resultados das projeções para anos-chave.

Ano	Período (anos)	Pop. - Método Geom. (0,87% a.a.)	Pop. - Método Geom. (0,77% a.a.)	Pop. - Método Reg. Log. (0,87% a.a.)	Pop. - Método Reg. Log. (0,77% a.a.)
2024	0	246,627	246,627	246,627	246,627
2029	5	257,21	256,297	257,192	256,266
2034	10	268,307	266,302	268,256	266,244
2039	15	279,942	276,659	279,841	276,575
2044	20	292,142	287,384	291,968	287,274
2049	25	304,935	298,492	304,659	298,355
2054	30	318,351	309,999	317,936	309,832
2059	35	332,422	321,923	331,821	321,721

Valores arredondados para o número inteiro mais próximo. Fonte: Elaboração própria.

Tabela 1: Projeções para anos-chave

## 4.4. ESCOLHA DO MÉTODO E CENÁRIO DE TRABALHO

### Análise da Escolha

- Método: A diferença entre o método geométrico e o de regressão logística é ínfima para as primeiras décadas, tornando-se mais perceptível apenas em prazos muito longos (50+ anos). Para um horizonte de 35 anos, o Método Geométrico é plenamente adequado e amplamente utilizado em estudos de planejamento de engenharia devido à sua simplicidade e transparência de cálculo.
- Taxa de Crescimento: A taxa histórica recente de Marília (0,87% a.a.) é um indicador válido, porém, as tendências demográficas nacionais e estaduais apontam para uma contínua desaceleração do crescimento. Adotar uma taxa ligeiramente mais conservadora alinha a projeção a um cenário mais prudente e realista, evitando superdimensionar o sistema.

Para o presente estudo, será adotado o cenário projetado pelo Método Geométrico utilizando a taxa de crescimento regional de 0,77% ao ano. Esta escolha oferece um equilíbrio entre:

1. Reconhecer o crescimento histórico positivo do município.
2. Incorporar a tendência de desaceleração populacional da região.
3. Fornecer uma base conservadora e segura para o dimensionamento futuro da usina de recuperação energética, garantindo que a mesma terá capacidade suficiente mesmo em um cenário de crescimento moderado.

É estimada uma população de projeto para 2059: 321.923 habitantes.

#### **4.5. PROJEÇÃO DA GERAÇÃO FUTURA DE RESÍDUOS SÓLIDOS DOMICILIARES (RSD)**

Conforme dados do IBGE para 2024 (<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/marilia.html>), o Município de Marília possui uma população estimada de 246.627 (DUZENTOS E QUARENTA E SEIS MIL, SEISCENTOS E VINTE E SETE) habitantes. Com base nesse dado, estima-se uma geração diária de 200 toneladas de Resíduos Sólidos Domiciliares (RSD), o que equivale a uma geração *per capita* de 0,811 kg/hab/dia. Partindo dessas premissas, tem-se:

Geração (2059) = População (2059) \* Geração per capita

Geração (2059) = 321.923 hab. \* 0,811 kg/hab./dia

Geração (2059)  $\approx$  261,07 toneladas/dia

Este valor demonstra um aumento significativo na demanda por tratamento de resíduos, reforçando a necessidade de se implantar um sistema robusto e com capacidade de expansão futura.

A geração *per capita* deverá revisada com base em campanha de pesagem e pode resultar em correções nos fluxos de massa.

### **5. RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA – TECNOLOGIAS**

Muito se tem falado sobre a sustentabilidade e as ações necessárias para um futuro consciente e promissor para a humanidade sem que seja comprometido o desenvolvimento atual, o qual é indispensável à evolução da sociedade.

As tecnologias de recuperação energética do lixo (chamadas, em inglês, de tecnologias waste-to-energy, WTE – em português, tecnologias de conversão de “lixo à energia”) são essenciais para as estratégias de gerenciamento dos resíduos sólidos urbanos. Elas recuperam energia, ao mesmo tempo em que reduzem o volume de lixo a ser enviado para disposição final.

Pela Europa, as usinas de recuperação energética do lixo produziram 55 TWh de energia em 2006 – sendo 31 TWh de calor e 24 TWh de energia elétrica –, o que representou, à época, 4,4% de toda geração renovável da Europa.

O uso ótimo destas tecnologias ocorre quando integradas às outras práticas de gerenciamento. Neste caso, somente os resíduos não recicláveis, que precisariam ser dispostos em aterros, seriam enviados às usinas de conversão de lixo em energia (usinas WTE). Isto ocasionaria, na maior parte das vezes, o aumento do valor energético dos resíduos sólidos utilizados no processo de conversão energética, o que é altamente positivo.

As tecnologias de tratamento térmico, em definição básica, transformam resíduos sólidos em calor, vapor, eletricidade, ou em combustíveis gasosos ou líquidos (neste último caso, oferece-se maior gama de utilidade, englobando desde a produção de energia à produção de químicos, por exemplo). As tecnologias que geram combustíveis líquidos e gasosos são chamadas de tecnologias de conversão térmica avançada, e compreendem, principalmente, os processos de gaseificação/pirólise e pirólise.

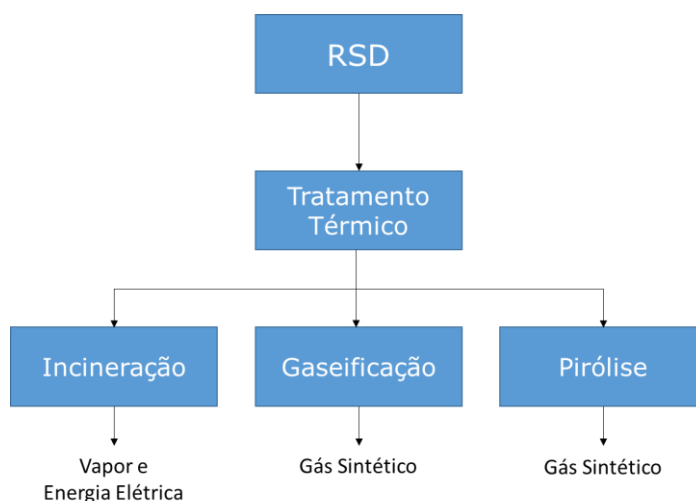


Figura 3 – Principais processos de recuperação energética

## 5.1. BIODIGESTÃO ANAERÓBIA – UTILIZAÇÃO DA FRAÇÃO ORGÂNICA (ÚMIDA)

A biodigestão anaeróbia é um processo biológico que decompõe matéria orgânica na ausência de oxigênio, produzindo biogás (composto principalmente por metano -  $\text{CH}_4$  e dióxido de carbono -  $\text{CO}_2$ ) e biofertilizante. Essa tecnologia emerge como uma solução estratégica para a

gestão de resíduos, geração de energia renovável e descarbonização de setores econômicos, alinhando-se aos princípios da economia circular.

### 5.1.1. FUNDAMENTOS DO PROCESSO E TECNOLOGIAS

O processo ocorre em quatro etapas biológicas sequenciais:

1. Hidrólise: Quebra de moléculas complexas (carboidratos, proteínas, gorduras) em compostos solúveis.
2. Acidogênese: Conversão em ácidos orgânicos voláteis.
3. Acetogênese: Transformação em acetato e hidrogênio.
4. Metanogênese: Produção de metano por microrganismos archaea.

### 5.1.2. PRINCIPAIS TECNOLOGIAS DE BIODIGESTÃO

- Biodigestores de Fluxo Contínuo (CSTR): Tanques agitados para resíduos com sólidos médios. Aplicação: Resíduos urbanos e agroindustriais.
- Biodigestores de Fluxo Pistão (Plug Flow): Ideal para resíduos com alta concentração de sólidos. Aplicação: Esterqueira animal.
- Biodigestores de Leito Fixo: Biofilmes aderidos a superfícies. Aplicação: Efluentes líquidos.
- Biodigestores de Membrana (MBR): Integração com membranas para maior eficiência. Aplicação: Alta demanda de purificação.

### 5.1.3. ESTÁGIO DA TECNOLOGIA NO MUNDO

A biodigestão é consolidada globalmente, especialmente em:

- Europa: Liderança em plantas de grande escala integradas a políticas de energia renovável (ex.: Alemanha, Suécia, Dinamarca).



- Estados Unidos e China: Maiores produtores de biogás agroindustrial, com incentivos governamentais.
- Avanços Recentes:
  - Co-digestão: Mistura de resíduos para otimizar produção.
  - Upgrading para biometano (BioGNV) para injeção em redes de gás ou uso veicular.
  - Integração com gaseificação/pirólise para aproveitamento integral de resíduos.

#### 5.1.4. ESTÁGIO DA TECNOLOGIA NO BRASIL

O Brasil possui potencial subutilizado, mas em expansão:

- Destaques:
  - Setor Sucroalcooleiro: Uso de vinhaça e palha para cogeração.
  - Aterros Sanitários: Captura de biogás para energia (ex.: São Paulo, Rio de Janeiro).
  - Agroindústria: Biodigestão de dejetos animais (suínos, aves).
- Desafios:
  - Altos custos de investimento inicial.
  - Nova regulamentação para biometano.
  - Falta de políticas públicas robustas.
- Oportunidades:
  - Crescimento do mercado de créditos de carbono (CBIOs).
  - Demanda por soluções para resíduos urbanos.

### 5.1.5. VANTAGENS E APLICAÇÕES DO BIOGÁS

- Energia Renovável: Geração de eletricidade, calor, CO<sub>2</sub> e biometano.
- Gestão de Resíduos: Redução de volume e odor.
- Biofertilizante: Substitui fertilizantes químicos.
- Redução de GEE: Evita emissões de metano de aterros e esterqueiras.

## 5.2. TECNOLOGIAS PARA CONVERSÃO TERMOQUÍMICA

A gaseificação, a pirólise e o *mass burning* (incineração) são tecnologias termoquímicas distintas para processamento de resíduos e biomassa, com diferentes princípios operacionais e aplicações. Embora todas envolvam tratamento térmico, diferem fundamentalmente quanto à presença de oxigênio, condições operacionais e composição dos produtos gerados.

## 5.3. GASEIFICAÇÃO

A gaseificação é o processo de conversão de biomassa, carvão, resíduos sólidos ou outros materiais carbonáceos em um gás combustível rico em energia (gás de síntese ou syngas), composto principalmente por CO, H<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e vapor d'água. O processo ocorre por oxidação parcial a altas temperaturas (geralmente entre 700 °C e 1.400 °C) e pressões que podem variar de atmosférica até cerca de 33 bar.

- Durante a gaseificação, o material é parcialmente oxidado com quantidade controlada de oxigênio (ou ar) e/ou vapor d'água.
- As reações são parcialmente exotérmicas (na gaseificação direta) ou endotérmicas (na indireta), produzindo um gás de alta qualidade térmica e química.
- Subprodutos sólidos (cinzas, carvão residual) e líquidos (alcatrão em pequena quantidade) são formados, mas a maior parte do carbono é convertida em gás.
- Existem dois tipos principais:
  - Gaseificação direta: o calor é gerado in situ pela combustão parcial do próprio material com ar ou oxigênio.
  - Gaseificação indireta: não há agente oxidante direto; o calor é fornecido externamente (ex.: por troca térmica ou combustão separada), geralmente usando vapor d'água como agente gaseificante, o que aumenta a concentração de hidrogênio no syngas.



A gaseificação é atualmente uma das rotas mais promissoras para produção de gás de síntese, hidrogênio, combustíveis sintéticos (via Fischer-Tropsch), amônia, metanol e geração de energia com baixo teor de emissões.

#### 5.4. PIRÓLISE

A pirólise é a decomposição térmica de materiais orgânicos na ausência total ou quase total de oxigênio, em temperaturas entre 400 °C e 800 °C (geralmente 500–600 °C). Diferentemente da gaseificação, o objetivo principal não é produzir gás combustível, mas sim uma mistura de três fases:

- Bio-óleo (ou óleo de pirólise): líquido rico em hidrocarbonetos, usado como combustível ou matéria-prima química.
- Carvão vegetal (biochar): resíduo sólido carbonáceo de alto valor (sequestro de carbono, fertilizante, etc.).
- Gás não condensável: mistura de CO, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e hidrocarbonetos leves, geralmente usado para aquecimento do próprio reator.

A pirólise é especialmente atraente para valorização de biomassa e resíduos (como plásticos, pneus, lodo de esgoto), pois permite recuperar produtos líquidos de maior valor energético que o syngas da gaseificação.

Os Desafios:

- Necessidade de triagem eficiente para separar a fração seca da orgânica úmida.
- Controle rigoroso do processo para evitar formação de compostos indesejados (ex.: alcatrões, gases ácidos).
- Tratamento adequado dos gases de exaustão para atender padrões ambientais.
- Viabilidade econômica depende de escala, logística e mercado para os subprodutos (bio-óleo, biochar).

#### 5.5. MASS BURNING

*Mass burning* é uma tecnologia de incineração direta de resíduos sólidos urbanos (RSU) sem necessidade de pré-tratamento complexo ou triagem prévia. Trata-se do método mais difundido de valorização energética por incineração no mundo, especialmente na Europa e no Japão.

O *mass burning* (incineração) é um processo de combustão completa de resíduos sólidos, geralmente em temperaturas entre 850 °C e 1.200 °C, com excesso de oxigênio. Diferente da

gaseificação (oxidação parcial) e da pirólise (ausência de oxigênio), a incineração tem como objetivo principal a redução do volume de resíduos (até 90%) e a geração de energia térmica ou elétrica por meio da queima direta. O processo produz principalmente calor (recuperado em caldeiras), cinzas e gases de combustão que exigem tratamento rigoroso para controle de poluentes como dioxinas, furanos e metais pesados.

### Funcionamento

1. Recepção e armazenamento: os resíduos coletados são entregues diretamente na planta e armazenados em bunker fechado.
2. Alimentação na fornalha: grandes guas misturam os resíduos para homogeneizar o material e alimentam o forno de grelha (o tipo mais comum), onde ocorre a queima em etapas (secagem, combustão e pós-combustão).
3. Combustão: a temperatura é mantida geralmente entre 850 e 1.100 °C, assegurando a destruição da matéria orgânica e reduzindo drasticamente o volume de resíduos.
4. Aproveitamento energético: o calor gerado aquece caldeiras para produzir vapor, que pode ser usado para geração de energia elétrica (turbinas a vapor) ou para aquecimento urbano/industrial (cogeração).
5. Tratamento de gases: sistemas avançados (lavadores, filtros de mangas, injeção de cal e carvão ativado) removem poluentes como partículas, ácidos (HCl, SO<sub>2</sub>, HF), metais pesados, dioxinas e furanos.
6. Resíduos finais: resultam dois subprodutos principais:
  - Cinzas de fundo: cerca de 20–25% do peso inicial, que pode ser usado em aplicações como base de pavimento, após tratamento.
  - Cinzas volantes: cerca de 3–5% do peso inicial, que contêm contaminantes e precisam de destinação controlada como resíduo perigoso.

A tecnologia de Mass Burning é hoje a forma mais comum de Waste-to-Energy (WtE) no mundo: queima direta do RSU em fornos de grelha, com aproveitamento energético e tratamento rigoroso de emissões. É indicada para cidades de grande porte, com alto custo de disposição em aterros e políticas de valorização energética de resíduos.

## 5.6. COMPARAÇÃO RESUMIDA DAS TECNOLOGIAS

Característica	Gaseificação	Pirólise	Mass Burning (Incineração)
<b>Presença de oxigênio</b>	Parcial (oxidação controlada)	Ausente ou mínima	Excesso (combustão completa)
<b>Temperatura típica</b>	700–1.400 °C	400–800 °C	850–1.200 °C
<b>Produto principal</b>	Gás de síntese (CO + H <sub>2</sub> )	Bio-óleo + biochar + gás	Calor + cinzas + gases
<b>Foco principal</b>	Produção de <i>syngas</i> para químicos e combustíveis	Produção de bio-óleo e biochar	Redução volumétrica e geração de energia

## 5.7. APLICAÇÃO INDUSTRIAL E TENDÊNCIAS ATUAIS

Historicamente, a gaseificação foi amplamente aplicada em escala industrial com carvão e coque de petróleo. Em 2013, segundo o Gasification and Syngas Technologies Council, cerca de 59% das plantas de gaseificação no mundo usavam carvão como matéria-prima, e 22% utilizavam coque de petróleo.

Atualmente, há forte crescimento no uso da gaseificação de biomassa e resíduos (RSU, resíduos agrícolas, lodo, plásticos), impulsionado pela necessidade de descarbonização, economia circular e produção de hidrogênio verde e combustíveis sustentáveis (SAF).

A pirólise vem ganhando espaço rapidamente na valorização de resíduos orgânicos e plásticos, com dezenas de plantas comerciais e centenas de projetos em desenvolvimento no mundo.

Já a incineração por *mass burning* continua sendo uma solução amplamente implantada para tratamento de resíduos urbanos, especialmente em regiões com limitações de espaço para aterros sanitários e necessidade de geração de energia baseada em resíduos. Modernas plantas de incineração incorporam sistemas avançados de recuperação de energia e controle de emissões.

Tanto a gaseificação quanto a pirólise permitem transformar resíduos sólidos (urbanos, industriais, agrícolas) em produtos de alto valor, reduzindo o descarte em aterros, emissões de metano e dependência de combustíveis fósseis. Quando bem projetadas, ambas as tecnologias são ambientalmente favoráveis e contribuem para uma economia circular e de baixo carbono.

A incineração, embora menos versátil na produção de produtos químicos, oferece uma solução robusta para redução volumétrica eficiente e geração de energia, especialmente quando combinada com sistemas avançados de tratamento de gases e recuperação de calor. Em contextos urbanos com grande geração de RSU, pode ser economicamente viável e ambientalmente controlada, atendendo a regulamentações rigorosas de emissões.

### 5.8. DIFERENÇA ENTRE AS TECNOLOGIAS

Para cada tecnologia utilizada existem produtos primários que são utilizados para diversas aplicações, o que resulta em produtos secundários.

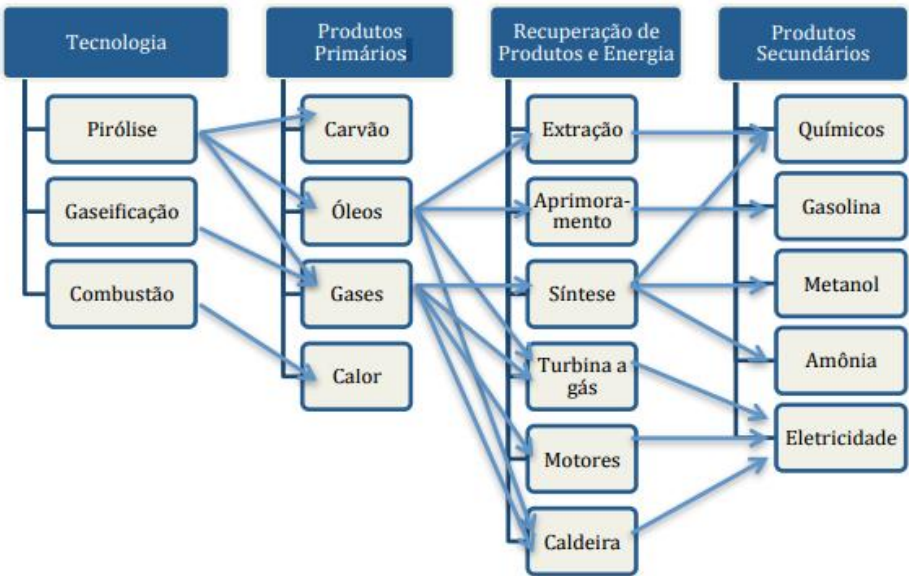


Figura 4: Produtos primários e secundários por tecnologia

## 5.9. VANTAGENS E DESVANTAGENS DAS TECNOLOGIAS

Tecnologia	Vantagens	Desvantagens
Incineração	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redução do volume e massa dos resíduos;</li> <li>- Destruição completa da maioria dos resíduos orgânicos perigosos;</li> <li>- Recuperação de energia (elétrica e/ou vapor d'água), que pode permitir a redução de custos operacionais</li> <li>- Vida útil do empreendimento é de 30 anos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Custo elevado de implantação e operação, devido principalmente aos controles ambientais;</li> <li>- Necessidade de mão de obra qualificada; - Maiores receios da sociedade de riscos à saúde devido às emissões de dioxinas, em relação às outras tecnologias.</li> <li>- Tempo estimado para licenciamento é de 24 a 36 meses (EIRA-RIMA) e construção é de 48 meses</li> <li>- Auto valor de Investimento, sendo rentável em grande escala, acima em Município de 1.000 habitantes.</li> </ul>
Pirólise	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Possibilidade de modularidade das plantas industriais conforme demandas locais;</li> <li>- Desvinculação da produção de eletricidade, pois combustíveis resultantes podem ser transportados até as centrais termelétricas;</li> <li>- Possibilidade de utilização de combustível auxiliar de baixo custo (como biomassa ou biogás);</li> <li>- Sistema de alimentação automático (contínua) ou semiautomático (em batelada)</li> <li>- Presença de queimadores auxiliares;</li> <li>- Não exige grandes áreas como o aterro, apenas a área da usina.</li> <li>- Vida útil do empreendimento é de 20 anos</li> <li>- - Tempo estimado para licenciamento é de 12 meses e construção é de 24 meses</li> <li>- A tecnologia de pirólise apresenta maturidade consolidada no exterior, porém ainda não há plantas em regime comercial com RSU no Brasil, o que requer tratamento diferenciado de alocação de risco no contrato."</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Heterogeneidade dos RSU dificulta o controle de variáveis operacionais;</li> <li>- Processo mais lento que a incineração e com maior consumo de combustível auxiliar;</li> <li>- Elevado custo operacional e de manutenção;</li> <li>- Constante trabalho de limpeza no sistema de alimentação de combustível auxiliar;</li> <li>- Elevado custo de tratamento dos efluentes gasosos e líquidos.</li> <li>- Como não temos uma planta em operação em regime comercial, não foi possível estimar a vida útil do empreendimento.</li> </ul>
Gaseificação/pirólise	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Redução do volume de resíduos a ser disposto (cerca de 90%)</li> <li>- As cinzas e o carbono residual permanecem no gaseificador, diminuindo assim a emissão de particulados;</li> <li>- Alta eficiência térmica, variando de 60% a 90%, conforme o sistema implementado;</li> <li>- Associada a catalisadores, como alumínio e zinco, a gaseificação/pirólise aumenta a produção de H<sub>2</sub> e CO (gáscombustível) e diminui a produção de CO<sub>2</sub>;</li> <li>- Não exige grandes áreas como aterro, apenas a área da usina.</li> <li>- Menor emissão de poluentes atmosféricos, em relação à incineração;</li> <li>- Vida útil do empreendimento é de 30 anos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- O resíduo deve estar seco, com umidade controlada de 18% a 25%</li> <li>- Potencial de fusão das cinzas a temperaturas acima de 900° C, que pode aumentar corrosão no equipamento;</li> <li>- O alcatrão formado durante o processo de gaseificação/pirólise, se não completamente abatido, pode limitar as aplicações do syngas.</li> <li>- O syngás resultante do processo de gaseificação/pirólise possui baixo PCI.</li> </ul>

Tabela 2: Vantagens e Desvantagens das Tecnologias



## 5.10. TABELA DE COMPARAÇÃO DAS TECNOLOGIAS PARA APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DE RSU

<b>Critério</b>	<b>Biodigestão Anaeróbia (FORSU)</b>	<b>Gaseificação (RSU seco / CDR)</b>	<b>Pirólise (RSU seco / CDR)</b>
<b>Maturidade tecnológica</b>	Alta (consolidada no Brasil e no mundo)	Média (consolidada para biomassa; ainda emergente para RSU no Brasil)	Baixa-média (maturidade internacional moderada; nenhuma planta comercial com RSU no Brasil)
<b>Escopo principal</b>	Fração orgânica (FORSU)	RSU seco, CDR, biomassa	RSU seco, CDR, plásticos
<b>CAPEX estimado</b>	R\$ 1.000 a 1.600 / t/ano	R\$ 3.000 a 5.500 / t/ano	R\$ 4.000 a 6.500 / t/ano
<b>OPEX estimado</b>	R\$ 130 a 220 / t tratada	R\$ 400 a 650 / t tratada	R\$ 450 a 700 / t tratada
<b>Eficiência de Conversão Energética (PCI → energia útil)</b>	18% a 25% (biogás → energia elétrica) 55% a 65% (biogás → upgrading para biometano)	30% a 45% (syngas bruto) 20% a 30% energia elétrica líquida	20% a 35% (óleo + gás)
<b>Produtos gerados</b>	Biogás, digestato, CO <sub>2</sub>	Syngas, biochar, cinzas	Óleo pirolítico, gás combustível, biochar
<b>Aplicação típica</b>	Produção de biometano, energia elétrica, biofertilizante	Energia elétrica / térmica, produção de combustíveis sintéticos	Produção de óleo combustível, monômeros químicos
<b>Flexibilidade ao tipo de resíduo</b>	Baixa (exige resíduo orgânico limpo)	Média (exige preparo, secagem e composição estável)	Baixa-média (sensível a contaminantes, cloro, PVC)



<b>Necessidade de pré-tratamento</b>	Alta (separação e remoção de rejeitos)	Muito alta (secagem, CDR, remoção de inertes)	Muito alta (secagem, preparação granulométrica)
<b>Dependência de mercado para subprodutos</b>	Baixa (biometano com demanda crescente)	Baixa/Média (syngas para energia elétrica)	Alta (mercado de óleo pirolítico incipiente no Brasil)
<b>Risco tecnológico</b>	Baixo	Médio	Alto
<b>Risco operacional</b>	Médio (sensível a contaminações físicas)	Alto (alta complexidade, risco de instabilidade térmica)	Alto (controle térmico complexo; corrosão e formação de alcatrão)
<b>Risco regulatório</b>	Baixo	Médio (licenciamento CETESB mais complexo)	Alto (sem referência nacional, maior rigor no licenciamento)
<b>Adequação para PPPs</b>	Altamente recomendada	Requer matriz de risco robusta	Pouco recomendada no Brasil
<b>Emissões atmosféricas</b>	Baixas (com controle adequando)	Médias (necessidade de pós-combustão)	Médias (depende de queimadores auxiliares)
<b>Área necessária</b>	Média/baixa	Média	Média
<b>Geração de rejeitos</b>	10% a 15% (rejeito não putrescível)	10% a 20% (cinzas, inertes)	20% a 30% (char, inertes)
<b>Requisitos de mão de obra</b>	Média	Alta (operadores especializados)	Alta
<b>Integração com aterro sanitário</b>	Excelente (redução de orgânicos → menor emissão difusa)	Média	Média



<b>Tempo de implantação</b>	12–24 meses	24–36 meses	24–36 meses
<b>Risco de desabastecimento de insumos</b>	Baixo	Médio	Alto
<b>Possibilidade de financiamento (BNDES, bancos)</b>	Alta	Média	Baixa

## 6. SÍNTESE DA PROPOSTA

Esta síntese consolida os aspectos operacionais, financeiros e legais essenciais para subsidiar a decisão dos gestores públicos municipais. A análise integrada dessas dimensões é fundamental para o diagnóstico do cenário atual da gestão de resíduos sólidos em Marília e para o planejamento de um sistema sustentável em consonância com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), com foco no aproveitamento energético dos resíduos como vetor de eficiência.

A seleção do sistema operacional a ser implantado deve ser precedida por uma avaliação técnica rigorosa, que priorize tecnologias de recuperação para o máximo aproveitamento do potencial calorífico e orgânico dos resíduos. Essa abordagem permite transformar um passivo ambiental em ativo energético, gerando receita por meio da comercialização de energia elétrica, biometano, CO<sub>2</sub> e/ou biofertilizantes, o que resulta em expressiva redução de custos operacionais no manejo e destinação final.

A opção mais vantajosa para o município será aquela que, aliando viabilidade financeira e eficiência operacional, maximize não apenas o retorno econômico, mas também os ganhos ambientais, com a mitigação de emissões de gases de efeito estufa, redução do volume destinado a aterros e extensão da vida útil dessas instalações.

A solução final poderá ser definida pelo concessionário, desde que cumpra metas de redução de envio a aterro e índices de recuperação energética, não sendo obrigatória a adoção simultânea de biodigestão e tratamento térmico.

Portanto, a escolha final deve ser pautada por um estudo criterioso que avaliou as tecnologias disponíveis para o tratamento com recuperação de energia, assegurando que a solução adotada garanta a sustentabilidade técnica, econômica e ambiental do sistema de gestão de resíduos para as futuras gerações.



## 6.1. LOCALIZAÇÃO DA USINA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS

Conforme estabelecido no planejamento técnico-operacional do projeto, a Usina de Recuperação Energética de Resíduos (URE) será implantada em área pública municipal estrategicamente definida, visando otimizar a logística de recebimento de resíduos, a integração com sistemas existentes e minimizar impactos socioambientais e urbanísticos.

A área destinada à construção da URE está localizada na:

Estr. Mun. Danilo Gonzáles, km 06 – Avencas, Marília – SP, CEP 17516-000

Trata-se de área municipal contígua ao antigo aterro sanitário de Marília, o que apresenta uma série de vantagens operacionais e ambientais, entre as quais se destacam:

**Sinergia com a infraestrutura existente:** A proximidade com o antigo aterro permite aproveitar vias de acesso já consolidadas, reduzindo a necessidade de abertura de novas estradas e os impactos associados.

**Logística eficiente:** A localização está inserida no fluxo já estabelecido de coleta e transporte de resíduos do município, garantindo economia de distância, tempo e custos operacionais.

**Contenção de impactos ambientais:** A concentração das atividades de destinação final de resíduos em uma única zona previamente destinada a essa finalidade ajuda a preservar outras áreas do município, direcionando e facilitando o monitoramento e a gestão ambiental.

**Aproveitamento de estudos prévios:** A região já é objeto de conhecimentos geotécnicos, hidrológicos e ambientais acumulados durante a operação do antigo aterro, o que agiliza e dá maior segurança às etapas de licenciamento e implantação da nova unidade.

**Distância adequada do núcleo urbano:** O local atende aos critérios de afastamento de zonas residenciais densamente povoadas, conforme orientações técnicas e sanitárias, assegurando compatibilidade com o ordenamento territorial do município.

## 6.2. OBJETIVO DO EMPREENDIMENTO

O empreendimento de recuperação energética de RSD tem como objetivo implementar atividades voltadas ao aproveitamento energético de resíduos sólidos, alinhando-se ao preconizado na Política Nacional de Resíduos Sólidos e ao Plano Municipal de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos de Marília, aprovado pela Lei Ordinária nº 9.278, de 26 de junho de 2025. Utilizando tecnologias inovadoras e sustentáveis, a iniciativa busca, principalmente:



1. Atender às metas legais e promover ganhos municipais: Garantir o cumprimento das diretrizes nacionais e municipais, posicionando Marília na vanguarda da gestão sustentável de resíduos. Com isso, o município terá ganhos ambientais, sociais e financeiros significativos, transformando um passivo em um ativo econômico.
2. Reduzir a disposição final e mitigar emissões: Reduzir drasticamente o volume de resíduos sólidos enviados ao aterro sanitário, contribuindo para a ampliação da sua vida útil e, ao mesmo tempo, mitigar emissões de gases de efeito estufa, promovendo uma significativa redução na emissão de poluentes para a atmosfera.
3. Fomentar a economia circular: Comercializar subprodutos resultantes do processo operacional, como energia elétrica, biometano (um combustível renovável e de baixo impacto ambiental), CO<sub>2</sub> e até Combustível Derivado de Resíduos (CDR), gerando nova receita e fomentando um ciclo de economia circular.

### 6.3. USINA DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA- URE

O empreendimento prevê a implantação tratamento e valorização dos resíduos sólidos domésticos, com solução final sendo definida pelo concessionário, não sendo obrigatória a adoção simultânea de biodigestão e tratamento térmico para a **fração seca (tratamento térmico - gaseificação ou pirólise)** e para a **fração úmida (biodigestão)**.

As rotas tecnológicas definidas poderão utilizar processos de forma isolada ou de forma combinada, garantindo máxima eficiência e flexibilidade operacional.

- O tratamento térmico converte a fração seca e de alto poder calorífico dos resíduos (como plásticos, papéis e tecidos) sob altas temperaturas em um gás de síntese (syngas), composto principalmente por monóxido de carbono e hidrogênio. Este gás pode ser utilizado para alimentar motores de combustão ou turbinas para geração de energia elétrica e térmica, ou ainda ser purificado para produção de biocombustíveis.
- A Biodigestão Anaeróbia, complementarmente, processa a fração orgânica (úmida) dos resíduos, por meio da ação de microorganismos em reatores fechados (biodigestores), produzindo biogás. Este biogás é subsequentemente purificado até atingir a qualidade de biometano, um substituto direto para o gás natural veicular (GNV) ou de rede. Outro subproduto gerado a partir do biogás é o CO<sub>2</sub>, adequados para aplicações industriais, comerciais e até médicas.

A seleção final da(s) tecnologia(s) foi orientada por estudos técnico-econômicos detalhados, considerando a composição gravimétrica dos resíduos do município para assegurar a máxima recuperação de recursos e viabilidade do projeto. Esta abordagem versátil destaca-se como uma solução eficiente, resiliente e alinhada às melhores práticas de sustentabilidade e economia circular.

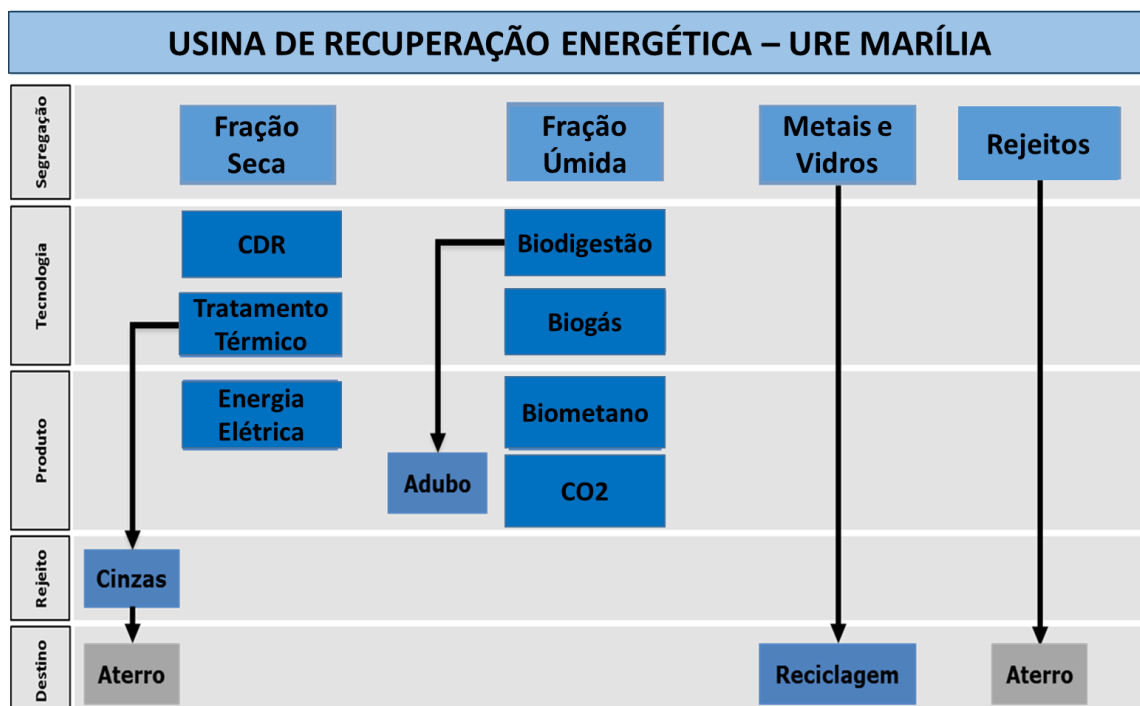


Figura 5: Modelo proposto do gerenciamento de resíduos sólidos

O empreendimento “Usina de Recuperação Energética de Resíduos – URE MARÍLIA”, deve receber a totalidade (100%) dos resíduos domésticos coletados no Município de MARÍLIA. A URE deve realizar uma segregação mecânica em duas grandes correntes:

- i) Fração Seca: Papel, papelão, madeira, plásticos diversos, têxteis, etc.
- ii) Fração Orgânica (úmida): Restos de comidas, resíduos de limpeza de feiras, etc.

#### 6.4. PROCESSOS – RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS

De acordo com a NBR 10004: 2004, os resíduos sólidos podem ser definidos como: “Resíduos nos estados sólido e semi-sólido, que resultam de atividades de origem industrial, doméstica, hospitalar, comercial, agrícola, de serviços e de varrição. Ficam incluídos nesta definição os lodos provenientes de sistemas de tratamento de água, aqueles gerados em equipamentos e instalações de controle de poluição, bem como determinados líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou corpos de água, ou exijam para isso soluções técnica e economicamente inviáveis em face à melhor tecnologia disponível.

Os Resíduos Sólidos Domiciliares (RSD) englobam principalmente os seguintes tipos de resíduos: resíduos domiciliares; resíduos de limpeza urbana (varrição, limpeza de logradouros e vias públicas e outros serviços de limpeza urbana); e resíduo comercial. De acordo com a NBR 10.004 os RSD podem ser classificados como Classe II-A, ou seja, resíduo não perigoso e não inerte, portanto, apesar de não ser perigo a princípio o resíduo deve ser destinado e disposto

adequadamente para se evitar riscos à saúde e ao meio ambiente devido ao seu caráter não inerte.

No Brasil, de acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei 12.305 de agosto de 2010, as definições para destinação e disposição finais ambientalmente adequadas são:

“VII - destinação final ambientalmente adequada: destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes do SISNAMA, do SNVS e do Suasa, entre elas a disposição final, observando normas operacionais específicas de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos;

VIII – disposição final ambientalmente adequada: distribuição ordenada de rejeitos em aterros, observando normas operacionais específicas, de modo a evitar danos ou riscos à saúde pública e à segurança e a minimizar os impactos ambientais adversos; (Brasil, 2012)”.

Portanto, a disposição final de RSD deve ser realizada em aterros sanitários, porém sabe-se que na realidade a maior parte dos RSD é disposta em aterros controlados ou lixões, ou seja, de forma inadequada.

A disposição inadequada de RSD pode gerar diversos riscos à saúde do homem e ao meio ambiente, através da proliferação de vetores e da contaminação de água, solo e ar, devido à produção de chorume e gases de decomposição, principalmente anaeróbia.

Sabe-se que com o desenvolvimento e crescimento econômico de um país o consumo cresce e, conseqüentemente, a quantidade de resíduos produzidos aumenta, de tal forma que há a exigência de um gerenciamento eficiente de resíduos para que possam ser reaproveitados ou dispostos da melhor maneira, mantendo a integridade do homem e do meio ambiente.

Alta prioridade também é dada à recuperação de matérias primas e energia dos resíduos, visto que grande parte do RSD se apresenta de forma bastante heterogênea sendo composta por diversos tipos de resíduo, de fácil e difícil degradação, e de difícil segregação para posterior reciclagem. Portanto, a sua utilização para fins energéticos é favorecida, pois a segregação não é necessária podendo esta ser feita apenas para metais e vidro. Porém tais prioridades nem sempre podem ser satisfeitas devido aos elevados rifados custos das tecnologias apropriadas e disponíveis.

Tanto a tecnologia de gaseificação quanto a tecnologia de pirolise podem ser instaladas no empreendimento, pois possibilitam a geração de uma mistura de gases combustíveis, derivados de resíduos sólidos domésticos, denominado “Gás Combustível Derivado de Resíduos” (GCDR) ou Gás Sintético (Syngás).

#### **6.4.1. TRATAMENTO TÉRMICO GASEIFICAÇÃO– UTILIZAÇÃO DA FRAÇÃO SECA**

A gaseificação é uma tecnologia que tem sido amplamente aplicada por mais de 50 anos na produção de combustíveis e produtos químicos. As tendências atuais na fabricação de produtos químicos e nas indústrias de petróleo indicam crescimento no uso da gaseificação/pirólise para a produção de gás de síntese, devido, principalmente, à produção de um gás consistente e de alta qualidade e a possibilidade de utilização de uma grande variedade de materiais como alimentação para o sistema.

Embora consolidada para biomassa e resíduos industriais, a gaseificação aplicada a RSU ainda é emergente no Brasil e requer matriz de riscos proporcional.

A gaseificação é definida como conversão de biomassa, ou qualquer combustível sólido (material carbonáceo sólido ou líquido), em um gás energético, através da oxidação parcial à elevada temperatura 500°C – 1400°C e pressão variável (atmosférica à 33 bar). Durante a gaseificação/pirólise, a maior parte do material de alimentação é termicamente decomposto na forma de gás, porém pequenas quantidades de subprodutos são também formadas, incluindo alcatrão, carvão e cinzas. Dependendo do design e condições operacionais do reator o processo também pode gerar metano e hidrocarbonetos.

O processo de gaseificação envolve reações químicas endotérmicas que requerem calor e produzem principalmente monóxido de carbono e hidrogênio. Existem dois tipos de gaseificação, uma indireta e outra direta. Na gaseificação direta, o processo acontece em um único reator, onde a oxidação exotérmica do carbono também ocorre. Gaseificadores diretos operam normalmente usando ar ou oxigênio como agentes oxidantes. Neste caso todo o calor necessário ao processo é produzido dentro do reator. Se o processo não ocorre com a ajuda de um agente oxidante, é conhecido como gaseificação indireta e precisa de uma fonte de energia externa. Vapor d'água é o agente de gaseificação mais comumente utilizado na gaseificação indireta, pois é facilmente produzido e aumenta a quantidade de hidrogênio no gás combustível produzido.

A utilização de resíduos sólidos, sejam eles provenientes de qualquer processo produtivo, torna a gaseificação ou pirólise econômica e ambientalmente favorável, tornando o processo sustentável.

Este gás será utilizado em outra etapa do empreendimento para a produção de energia térmica (caldeira) e posteriormente energia elétrica em “ciclo rankine” (turbina e gerador).

O processo global de gaseificação é composto por etapas sequenciais, de forma a condicionar cada etapa do tratamento térmico a um refinado controle da cinética das reações físicas e químicas decorrentes da decomposição dos resíduos sólidos domésticos, para a formação de um gás combustível sintético, com o objetivo à sua total combustão para o aproveitamento

energético, conforme recomenda o Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

Baseado no estudo dos mecanismos de reações envolvidas nas etapas de gaseificação, reforma dos gases e câmara de combustão, as variáveis de processo são controladas de forma favorecer as reações de RSD, com produção de um gás produto com poder calorífico razoável, de acordo com a qualidade do material, necessidade de energia para as reações endotérmicas e estequiometria das reações homogêneas e heterogêneas.

Estas propriedades físicas exigem que a engenharia construtiva do equipamento seja derivada de um prévio conhecimento de todo o processo, para condicionar mecanismos de controle, garantir a obtenção de máximo aproveitamento do conteúdo combustível dos RSD, e produzir um gás combustível capaz de dar ao sistema, uma condição de auto sustentabilidade energética, tanto para a produção do syngás, quanto para a ignição da combustão dos gases.

### **DESCRIÇÃO DO PROCESSO PARA GERAÇÃO DE ENERGIA**

O processo de recuperação de energia, para a geração de energia elétrica, se resume a 3 (três) grandes etapas: i) valorização do combustível; ii) gaseificação ou pirólise; iii) geração de energia.

#### **i. VALORIZAÇÃO DOS RESÍDUOS**

O combustível derivado de resíduos (CDR) é produzido a partir dos resíduos sólidos domésticos e industriais não perigosos que incluem materiais biodegradáveis e plásticos. Os materiais não combustíveis, como vidro e metais, são removidos e o material residual é triturado.

O objetivo desta etapa é usar a energia valiosa contida nos resíduos e substituir o uso de combustíveis fósseis. Durante o processamento, a fração com alto valor calorífico são separadas da fração orgânica, com pouco valor calorífico.

Para a valorização dos resíduos e aumentar significativamente o seu poder calorífico, será utilizado um processo mecanizado.

- 1) Recepção do RSD
- 2) Trituração primária ou pré-trituração (abre-sacos)
- 3) Classificação ou separação
- 4) Separação de materiais ferrosos e não ferrosos
- 5) Triturador secundário

O resultado desta valorização é um combustível (CDR) com poder calorífico significativo que será utilizado para aproveitamento energético, para a geração de energia elétrica.

O CDR é produzido e utilizado no mesmo empreendimento, sendo empregado com o objetivo de geração de energia (elétrica, vapor e gás).

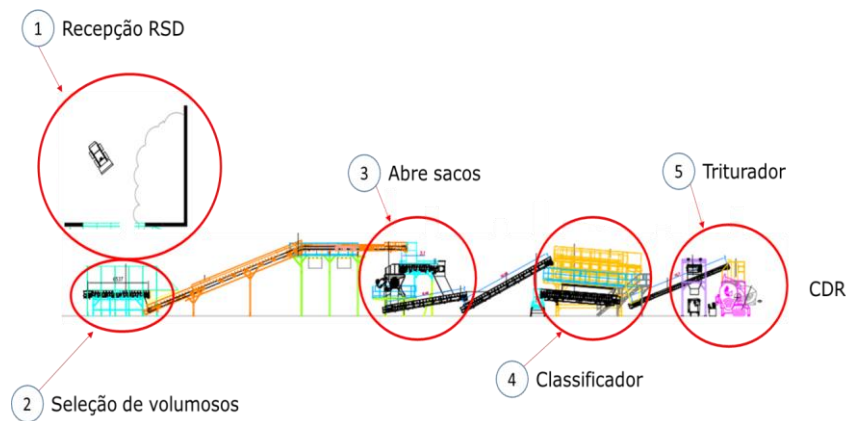
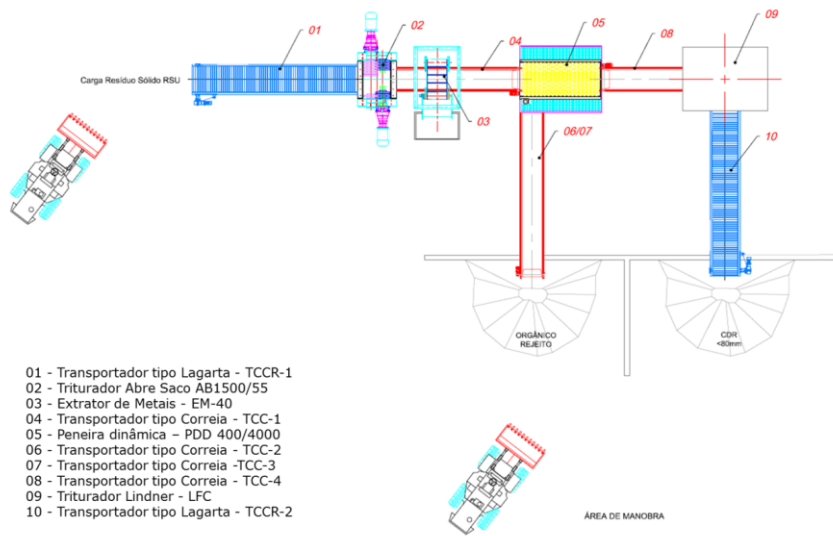


Figura 6 – Processo de Valorização do Resíduo Sólido Doméstico



- 01 - Transportador tipo Lagarta - TCCR-1
- 02 - Triturador Abre Saco AB1500/55
- 03 - Extrator de Metais - EM-40
- 04 - Transportador tipo Correia - TCC-1
- 05 - Peneira dinâmica - PDD 400/4000
- 06 - Transportador tipo Correia - TCC-2
- 07 - Transportador tipo Correia - TCC-3
- 08 - Transportador tipo Correia - TCC-4
- 09 - Triturador Lindner - LFC
- 10 - Transportador tipo Lagarta - TCCR-2

Figura 7 – Planta - Processo de Valorização do Resíduo Sólido Doméstico

## ii. TECNOLOGIA DA GASEIFICAÇÃO

O processo global de gaseificação/pirólise do empreendimento engloba três estágios: Estágio 1.: Desidratação e Oxidação do CDR; Estágio 2.: Reforma dos gases; Estágio 3.: Câmara de Combustão.

É realizada em estágios distintos:

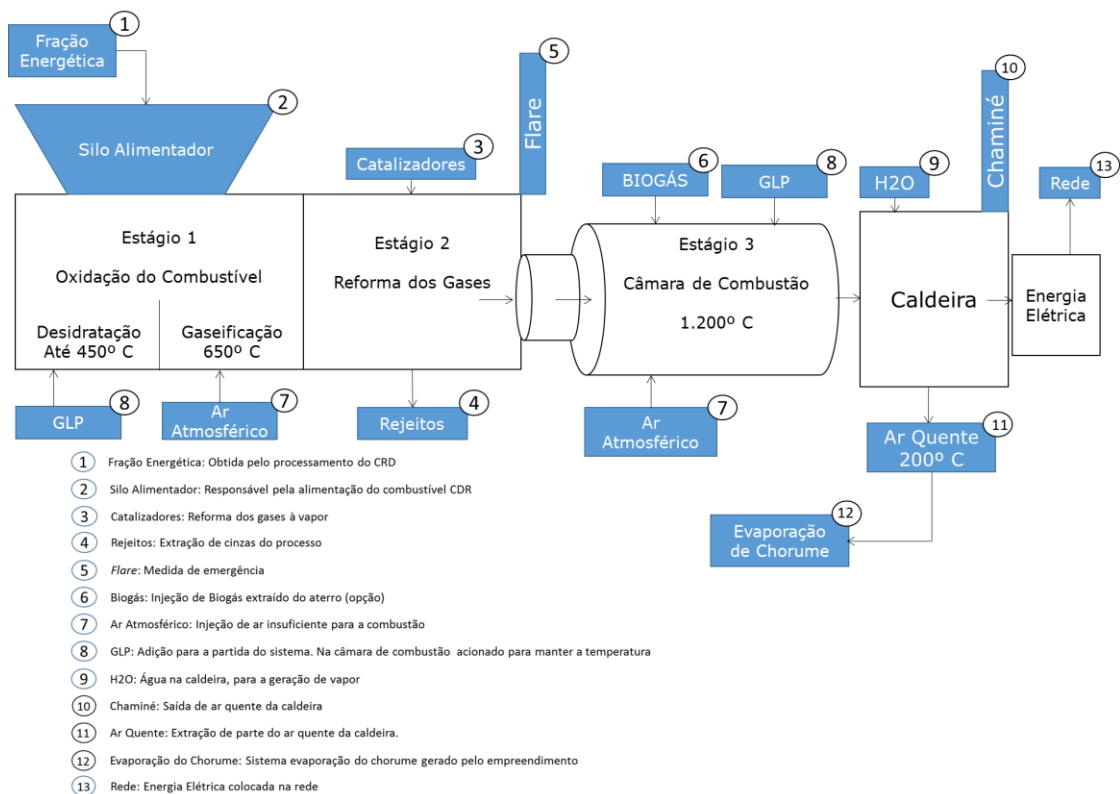


Figura 8 – Processo de Gaseificação/pirólise

Estágio 1: Oxidação do Combustível

Na partida do equipamento este processo é iniciado por meio de ignitores a GLP. Em poucos minutos a câmara alcança as condições de trabalho e os ignitores são desligados.

A fração energética é inserida na primeira câmara por intermédio do silo alimentador, para iniciar a desidratação e decomposição térmica. Essa câmara foi especialmente projetada para esta finalidade, onde o CDR é transportado em um sistema de grelhas móveis, desenhadas especialmente para este processo, de forma contemplar diferentes fases, ter eficiência no transporte e controle de entrada de uma quantidade insuficiente de oxigênio para combustão completa.

Uma vez o CDR inserido na câmara de gaseificação pela ação do silo dosador, inicia-se a decomposição térmica. O vapor d'água, líquidos orgânicos e gases não condensáveis são separados da parte sólida (carvão e cinzas).

O oxigênio presente através da introdução controlada de ar aquecido, feita por um ventilador específico, oxida parcialmente o carbono fixo do CDR que constitui a fonte de energia térmica para o processo de volatilização e gaseificação. O ar aquecido é injetado, controladamente através do leito móvel. O sistema de controle fornece, a cada região do leito, somente o ar necessário para a liberação do calor suficiente para manter a temperatura ideal. Diversos



sensores de temperatura no interior da câmara, estrategicamente posicionados, fornecem ao PLC (controlador lógico programável) as informações necessárias para o controle preciso da injeção de ar aquecido através da atuação sobre a velocidade dos ventiladores.

Mediante as condições ideais e controladas da câmara, inicia-se a fase da gaseificação/pirólise propriamente dita, incluindo reações heterogêneas entre os gases e reações homogêneas entre os produtos já formados.

O tempo de retenção e a temperatura são previamente calculados, de forma transformar todo o conteúdo combustível do CDR em *Syngás* com um determinado poder calorífico.

Os gases gerados nesse estágio são puxados desta câmara por diferença de pressão, através de um sistema *Venturi*. Esse sistema quando em um sistema fechado, o gás em movimento constante dentro de um duto uniforme comprime-se momentaneamente ao encontrar uma zona de estreitamento diminuindo sua pressão e consequentemente aumentando sua velocidade ao atravessar a zona estreitada onde ocorre "também" uma baixa pressão.

Ainda na câmara de gaseificação, acontece o craqueamento do alcatrão, a destruição térmica das moléculas dos compostos que constituem o alcatrão, obtendo como produtos CO, CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e outros gases. Esta etapa ocorre na gaseificação/pirólise de material orgânico.

Resultando deste processo temos as cinzas que após análises foram classificadas como Resíduos Classe II-A não inerte. Outros sub-produtos e resíduos são os materiais não combustíveis, tais como minerais, metais, cerâmicos, entre outros vários que podem estar presentes no CDR. As cinzas e os outros sub-produtos serão encaminhados para o aterro que fica anexo ao empreendimento

### Estágio 2: Reforma dos Gases

A reforma dos gases será realizada através da aplicação de vapor com catalisadores de reação tipo "Fischer-Tropsch" (processo químico para produção de hidrocarbonetos a partir de gás de síntese), o que impacta significativamente o poder calorífico do syngás.

Também será utilizado um processo que é composto por um inédito conjunto catalisador de placas metálicas onduladas, paralelas e revestidas com níquel, de forma a promover a reforma a vapor.

Esta disposição e conformação possuem como finalidade promover uma maior área de contato entre o catalisador e os gases reagentes, sem grandes perdas de carga, devido à passagem dos gases em direção à câmara de combustão.

As placas possuem pés que servem de posicionadores, para que sejam empilhadas com a

distância necessária à passagem dos gases, formado um conjunto que, desta forma, pode ser montado em formato modular, adicionando-se ou retirando-se placas, se adequando aos mais variados tamanhos de reatores.



Figura 9 – Gaseificador instalado, licenciado e em funcionamento no Brasil

### Estágio 3: Câmara de Combustão

Após a geração do syngás no interior do gaseificador, é importante a existência de uma câmara de combustão externa, cuja função é queimar esse gás antes de seu aproveitamento energético.

O objetivo dessa etapa é:

- Oxidar completamente o syngás, eliminando compostos orgânicos persistentes;
- Inibir a formação de dioxinas e furanos, moléculas tóxicas que podem se formar na faixa de temperaturas intermediárias (200–450 °C) em processos mal controlados de queima de resíduos;
- Garantir maior estabilidade térmica, mantendo a chama em condições adequadas de turbulência, tempo de residência e temperatura (os 3 “T’s” da boa combustão: tempo, temperatura e turbulência).

Na prática, a câmara de combustão funciona como uma barreira de segurança ambiental, pois a destruição térmica do syngás ocorre fora do gaseificador, em ambiente projetado para atingir temperaturas superiores a 850 °C (podendo ultrapassar 1.100 °C, dependendo do projeto), o que reduz drasticamente a probabilidade de recombinação molecular indesejada.

Esse arranjo tecnológico é fundamental para garantir que o processo de valorização energética



de resíduos via gaseificação/pirólise ocorra de forma segura, eficiente e ambientalmente adequada, alinhado às normas internacionais de controle de emissões atmosféricas.

### **iii. CONCEPÇÃO DO PROJETO**

Compreende a produção de CDR – Combustível Derivado de Resíduos para o seu aproveitamento energético utilizando a tecnologia de gaseificação.

Será instalado em área de aproximadamente 3.000 m<sup>2</sup>, no Município de MARÍLIA.

As obras necessárias para a implantação do empreendimento se resumem a obras civis, com a construção de galpão para a atividade em questão, não tendo a necessidade de remoções de terras.

### **iv. LAYOUT DO EMPREENDIMENTO**

O empreendimento completo que pode ser instalado deve ter área total de aproximada de 15.000 m<sup>2</sup>, sendo divididos da seguinte maneira:

O empreendimento possuirá 5 (cinco) macro etapas distintas:

1ª Etapa: Produção de CDR;

2ª Etapa: Gaseificação/pirólise;

3ª Etapa: Produção de Vapor;

4ª Etapa: Geração de Energia Elétrica.

5ª Etapa: Biodigestão

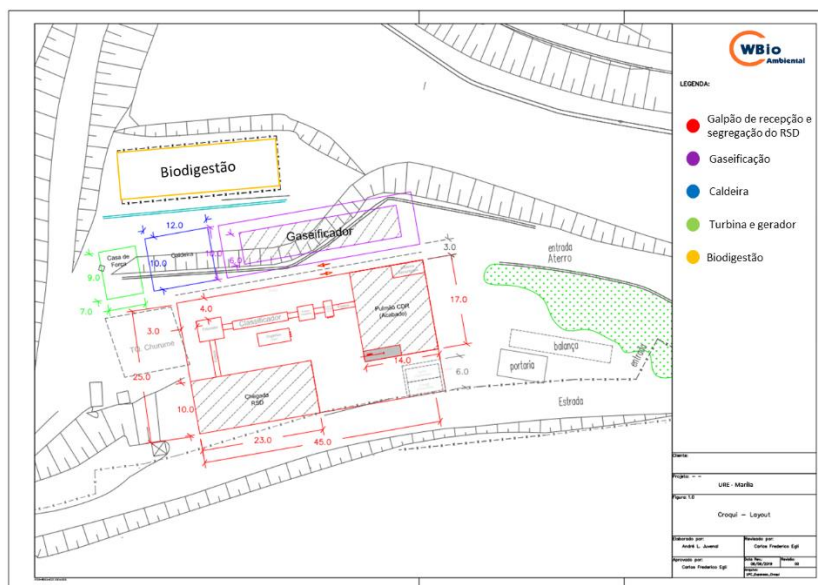


Figura 10 – Layout do empreendimento

## 1ª ETAPA – PRODUÇÃO DO CDR

Este prédio possuirá área de aproximadamente 1.125 m<sup>2</sup> (45 m x 25 m e com 10 m de altura livre) e construído em concreto pré-fabricado, coberto, fechado, com portas que permitem a entrada de caminhões para descarga. Estas portas são automáticas e permanecem abertas somente durante o descarregamento dos caminhões.

As paredes e o fundo de concreto são impermeabilizados sendo que, o segundo, conta com canaletas de drenagem que coletam a água e o efluente líquido gerado e captado, será armazenado em uma cisterna, da onde uma bomba os injeta na reforma de gases.

Esta etapa do empreendimento compreende:

1. Recepção: O resíduo sólido doméstico será recebido diariamente sendo depositado em área determinada de aproximadamente 230 m<sup>2</sup>, capacidade para o recebimento diário de 257 ton/dia. Todo o resíduo recebido será processado no mesmo dia.

2. Abre sacos: Por intermédio de pás carregadeiras será alimentada uma esteira onde alimentará o abre sacos. Esse equipamento com o objetivo de assegurar uma abertura eficiente dos sacos que chegam às instalações de tratamento de resíduos urbanos e embalagens, possui grande eficiência na abertura de sacos (maior de 95%).

O equipamento dispõe de um rotor que trabalha a baixas rotações acionado através de um motor elétrico. O sistema de transmissão do motor ao rotor é constituído por uma correia e um redutor do tipo planetário. A velocidade de rotação do rotor pode controlar-se através de

variador de frequência (de 0 a 12 rpms).

O rotor incorpora uma série de dentes desagregadores, dispostos em espiral ao longo de toda a sua superfície, que abrem os sacos ao passar pelos dentes fixos da comporta

3. Extração de metais: O Extrator de metais retira do RSD, automaticamente, metais ferrosos por uma caixa de imãs permanentes de ferrite com uma correia borracha tracionada por um motor elétrico, retirando todos os metais que possam prejudicar as máquinas do processo, o material retirado é armazenado numa caçamba.

4. Classificação: Nesta etapa o objetivo é separar o RSD em 2 frações: Fração Orgânica e Fração Energética.

A massa de material que alimenta a peneira através da correia de alimentação, é transferido para sobre os discos da peneira onde o material é agitado e batido fortemente e assim separado em 2 frações; aquele que cai entre os discos/eixos é a fração orgânica e o material que segue sobre a peneira até o final é a fração energética.

A fração orgânica cairá em caçambas e seguirá para o aterro, enquanto a fração energética seguirá para o processo de produção de CDR.

5. Trituração: O resíduo recebido será colocado em uma esteira que será encaminhado para um triturador, com o objetivo de triturá-los para atingir uma granulometria adequada. Ao término dessa operação, por esteira rolante o resíduo triturado será encaminhado para a próxima etapa.

6. Estoque de CDR: A última área nesta etapa é o setor de estoque de combustível derivado de resíduos, com dimensões de 14m x 17m, totalizando 467 m<sup>3</sup>, com 3 metros de profundidade e 3 metros de altura, sendo capaz de armazenar aproximadamente 360 ton de CDR acabado.

Na área existirá uma rampa de acesso para a entrada de pá-carregadeira, responsável pela movimentação interna do combustível, bem como com o carregamento do combustível no sistema de alimentação para a próxima etapa.

## 2ª ETAPA – GASEIFICAÇÃO

Este prédio possuirá área de aproximadamente 300 m<sup>2</sup> (40 m x 10 m e com 15 m de altura livre) e construído em concreto pré-fabricado, coberto, com abertura nas laterais.

O gaseificador é, externamente, uma “caixa” em chapas de aço carbono estruturadas com perfis do mesmo material, constituindo uma câmara hermeticamente fechada. Internamente, esta câmara é isolada com uma espessa camada de fibra cerâmica que, por sua vez, é protegida do

contato com o gás por uma camada de tijolos refratários. A temperatura da face externa, durante a operação, é de 50°C.

As dimensões externas aproximadas de cada câmara de gaseificação/pirólise são: largura 4,2m, comprimento 12,5m e altura 10,5m. Totalmente instalado acima do nível do piso

No fundo da câmara está instalado um leito móvel que movimenta continuamente o CDR/RSD e à medida que a parte volátil é gaseificada, o leito descarrega as cinzas em um extrator por correntes que as retira da câmara em modo contínuo, depositando as em uma caçamba fechada para posterior destinação final no aterro sanitário que fica no mesmo terreno do empreendimento.

O gaseificador conta com uma série de medidores de vazão de ar e água, sensores de temperatura, sensores de pressão e analisadores de gás que, através dos seus respectivos transmissores, enviam sinais, em tempo integral, a um PLC para controle do processo, garantindo as condições ideais para a gaseificação/pirólise e reforma de gases. Todos estes dados são monitorados, armazenados e disponibilizados (em rede ou não) por um sistema supervisão. O funcionamento é totalmente automatizado.

A pressão interna do gaseificador é controlada e mantida sempre abaixo da pressão atmosférica através de um sistema de tiragem induzida, evitando qualquer vazamento de gases para o meio externo.

O queimador de gás combustível derivado de resíduos (GCDR) já está dimensionado para atender a capacidade total da planta. O conjunto abrange desde os dutos de admissão do GCDR até a saída da câmara de combustão.

Este tipo de queimador já é largamente utilizado na queima de gás de alto forno em caldeiras na indústria siderúrgica.

O duto de admissão é cilíndrico, corpo externo em aço e revestido internamente com tijolos isolantes protegidos por uma camada de tijolos refratários. Basicamente, este duto liga a saída dos gaseificadores à câmara de combustão e tem aproximadamente 1,8m de diâmetro e 12,0m de comprimento.

A forma construtiva da câmara de combustão cilíndrica segue o mesmo princípio do duto de admissão, porém, com revestimento interno dimensionado para elevadas temperaturas. Seu desenho proporciona alto nível de turbulência garantindo a queima completa do GCDR e suas dimensões visam o tempo de residência dos gases e a acomodação da chama.

O queimador, em si, é um conjunto de equipamentos e dispositivos, acoplados a câmara de combustão, que fazem a ignição, o controle da queima e o desligamento (seguros) do próprio.

Especificamente estamos falando de controlador de chama, “damper’s” com posicionadores, válvulas de bloqueio, ignitores, turbuladores, sensores de temperatura, sensores de chama para segurança, analisadores de gases para garantia da queima completa com o menor excesso de ar possível, medidores da vazão de ar, ventiladores variáveis para injeção de ar, entre outros, tudo em total conformidade com a NBR 12.313.

O GCDR é aspirado da câmara de gaseificação/pirólise para dentro da câmara de combustão cilíndrica pela ação do exaustor de tiragem induzida e pelo efeito “Venturi” proporcionado pela injeção de ar aquecido para a combustão.

O ar pré-aquecido para a oxidação do GCDR é injetado na câmara de combustão pela ação de um ventilador específico. O controle desta injeção é feito em função dos sinais obtidos dos analisadores de CO e O<sub>2</sub> e dos sensores de temperatura instalados na saída da câmara. O PLC está programado para buscar a menor concentração possível de O<sub>2</sub> nos gases combustos sem aumentar a concentração de CO.

Na prática, isto acontece por meio da alternância entre o recebimento e análise, pelo PLC, dos dados do sensor de CO, a tentativa de redução de injeção de ar e nova análise da medição de CO. Desta forma, obtém-se a maior temperatura de combustão possível.

Sensores de chama monitoram continuamente a câmara de combustão certificando-se que há ignição. Caso ocorra a perda da ignição o queimador a GLP é ligado imediatamente garantido a total queima dos gases residuais oriundos da câmara de gaseificação/pirólise.

### **3ª ETAPA: PRODUÇÃO DE VAPOR EM CALDEIRA**

A 3ª etapa é a produção de geração de vapor, por intermédio de uma caldeira de recuperação, por intermédio do Ciclo Rankine.

A caldeira do empreendimento é um equipamento robusto, possui a função de recuperar o calor dos gases combustos pela etapa anterior, para a produção de vapor superaquecido para suprir as necessidades do processo e alimentar os geradores para produção de energia elétrica. Opera no modo recuperação de calor, com fluxo de gases vertical, apoiada em estrutura metálica.

A caldeira para a geração de vapor necessita d’água, recurso esse que será desmineralizada e desgaseificada adequadamente.

A água necessária para a utilização no empreendimento será por intermédio de caminhões pipa, pois o local não possui poços de captação e não somos atendidos pela concessionária local. Sendo assim, o empreendimento está dispensado de solicitação de outorga.

Será instalado no empreendimento um tanque de armazenamento com capacidade de

aproximadamente 30.000 litros d'água, bem como a captação de água pluvial. Essa água será tratada em um pequeno sistema de tratamento.

O consumo de água para utilização na caldeira de recuperação está estimado em 20 m<sup>3</sup>/h.

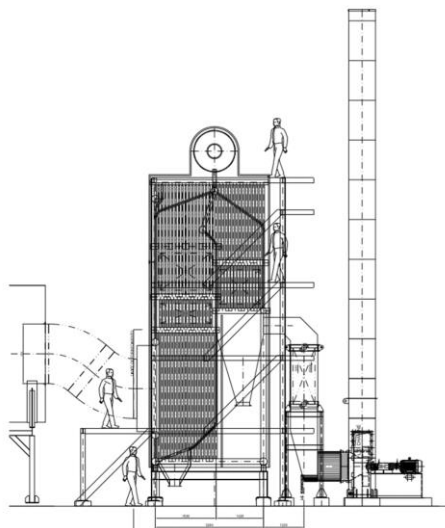


Figura 11 - Caldeira de Recuperação

O involucro externo é constituído de tubos aletados formando uma superfície estanque para operação com pressão positiva, aceitando gases de alta temperatura, com mínima manutenção.

#### **4ª ETAPA: GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA.**

O empreendimento gerará energia elétrica, com a capacidade instalada de 2,5 MW.

A geração de energia, pelo ciclo térmico "Rankine", dar-se-á através do acionamento de um conjunto turbo gerador, com turbina de condensação, através de ciclo regenerativo, contemplando dois aquecedores de água regenerativos e mais o desaerador.

Turbina a vapor é uma máquina térmica que aproveita a energia térmica do vapor sob pressão, gerado por uma caldeira, convertendo-a em trabalho mecânico útil através de uma transformação de dilatação térmica. Por exemplo, quando a turbina é acoplada a um gerador, obtém-se a transformação da energia mecânica em energia elétrica.

Seu funcionamento não difere das turbinas usadas em termelétricas convencionais a vapor. O vapor que sai da turbina é condensado e volta a ser usado como água de alimentação da caldeira de recuperação de calor.



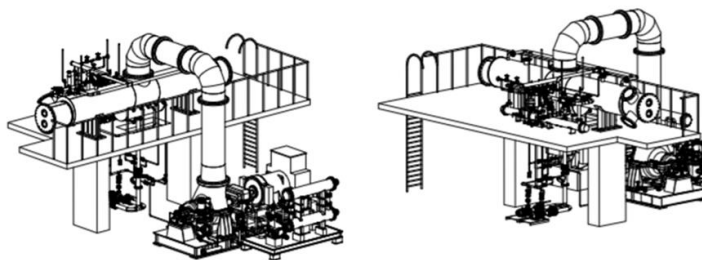


Figura 12 – Turbina e Gerador

#### 6.4.2. TRATAMENTO TÉRMICO PIRÓLISE– UTILIZAÇÃO DA FRAÇÃO SECA

A pirólise é uma tecnologia termoquímica utilizada para a decomposição de materiais orgânicos na ausência total ou parcial de oxigênio. No contexto do manejo de resíduos sólidos urbanos (RSU), ela surge como uma alternativa avançada de recuperação energética (Waste-to-Energy – WtE), capaz de reduzir significativamente o volume destinado a aterros sanitários, gerar produtos energéticos de valor agregado e contribuir para metas ambientais e climáticas.

Este relatório apresenta uma visão técnica consolidada para integração da pirólise em um projeto de Parceria Público-Privada (PPP) para gestão de RSU, incluindo descrição do processo, aplicação para geração de energia, fluxograma operacional e considerações relevantes para estudos de modelagem e viabilidade.

#### CONTEXTO DA TECNOLOGIA

A pirólise vem sendo aplicada industrialmente em setores como biomassa, plásticos, pneus e resíduos industriais, e mais recentemente tem sido estudada para aplicação em RSU devido à sua capacidade de:

- Reduzir massa e volume de resíduos (até 80% e 90%, respectivamente);
- Gerar produtos energéticos como syngas, bio-óleo e biocarvão;
- Tratar resíduos com menor emissão atmosférica em comparação a sistemas de combustão direta;
- Permitir modularidade e integração com outras tecnologias (ex.: triagem, CDR, biodigestão).

Embora seja considerada tecnologia emergente para RSU, apresenta avanços significativos em

escala piloto e semi-industrial, e seu potencial depende de qualidade do combustível derivado de resíduos (CDR), estabilidade do processo e objetivos energéticos do projeto.

### **Descrição Geral do Processo**

A pirólise consiste na decomposição térmica do componente orgânico dos resíduos sob temperaturas entre 350°C e 800°C, em atmosfera controlada sem presença de oxigênio. Os RSUs, após pré-triagem e preparação, são submetidos ao reator pirolítico, onde se transformam em três frações principais:

1. Gases pirolíticos (syngas) – combustível gasoso contendo H<sub>2</sub>, CO, CH<sub>4</sub> e outros hidrocarbonetos leves;
2. Líquidos condensáveis (bio-óleo) – mistura oleosa com poder calorífico moderado, aplicável como combustível industrial após tratamento;
3. Sólidos carbonosos (biochar) – resíduo com aplicação potencial como corretivo de solo, insumo industrial ou combustível sólido.

A proporção de cada produto depende da tecnologia empregada, da composição dos resíduos e da temperatura operacional.

### **Pirólise para Geração de Energia**

Os produtos da pirólise podem ser convertidos em energia de diferentes formas:

#### **1. Geração Elétrica**

- O syngas, após limpeza e resfriamento, pode alimentar motores de combustão interna ou microturbinas.
- Alternativamente, pode ser queimado em caldeiras para produção de vapor e acionamento de turbinas a vapor.

#### **2. Geração Térmica**

- Calor residual do reator pode ser aproveitado para secagem de resíduos, climatização industrial ou produção de vapor industrial.

#### **3. Coprodutos Energéticos**

- O bio-óleo pode ser empregado como combustível em caldeiras ou refinado para usos mais avançados.

- O biochar pode substituir carvão mineral em aplicações térmicas específicas.

A escolha da rota depende dos objetivos da PPP, disponibilidade de infraestrutura energética local e requisitos de licenciamento.

### **Etapas do Processo de Pirólise Aplicada a RSU**

As etapas típicas são:

#### **1. Pré-triagem e preparação do resíduo**

- Remoção de recicláveis secos (papel, plástico, metais, vidro);
- Descarte de rejeitos impróprios;
- Produção de CDR com granulometria padronizada.

#### **2. Secagem do CDR**

- O ideal é umidade < 20% para maximizar rendimento energético.

#### **3. Alimentação do Reator**

- O CDR é inserido de modo contínuo ou batelada.

#### **4. Pirólise (Reação Termoquímica)**

- Aquecimento progressivo e decomposição térmica;
- Liberação de vapores e gases;
- Formação de sólidos carbonosos.

#### **5. Condensação e separação**

- Os gases são resfriados e divididos em:
  - syngas não condensável;
  - bio-óleo condensável.

#### **6. Limpeza e Adequação do Syngas**

- Remoção de particulados e compostos ácidos;

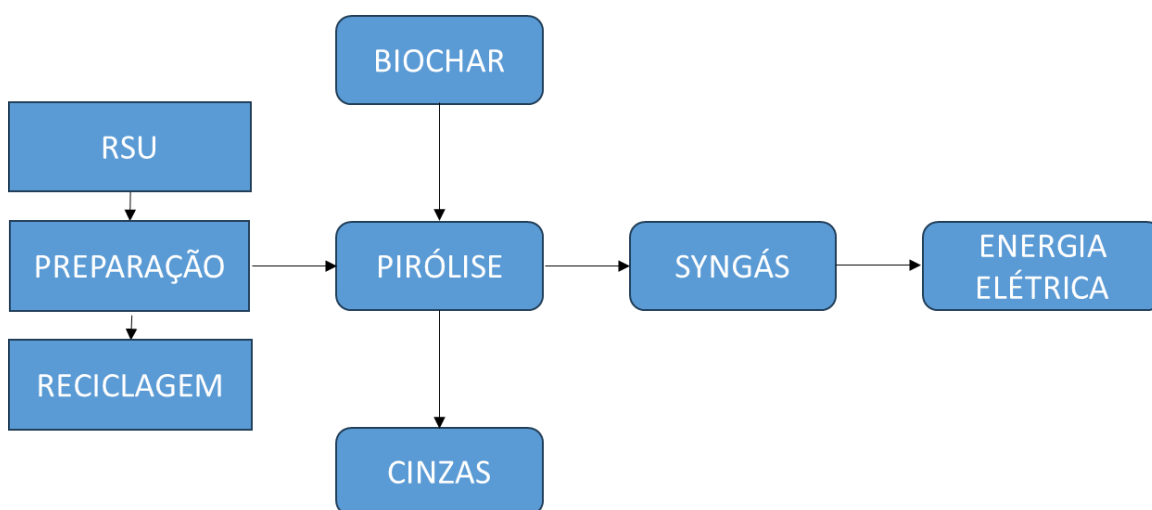
- Ajuste para uso energético.

## 7. Aproveitamento Energético (elétrico e/ou térmico)

## 8. Gestão dos Resíduos Sólidos Remanescentes

- Estabilização e destinação do biochar;
- Monitoramento de emissões atmosféricas.

### Fluxograma Básico do Processo



### Considerações Técnicas Importantes

- Composição do resíduo é fator crítico: variações podem afetar PCI, rendimento e estabilidade.
- Viabilidade exige triagem eficiente: pirólise não é adequada para resíduos brutos com alta umidade.
- Integração com outras tecnologias: recomendada combinação com compostagem ou biodigestão.
- Aproveitamento do biochar: necessidade de certificação para usos agrícolas ou industriais.

### 6.4.3. BIODIGESTÃO – UTILIZAÇÃO DA FRAÇÃO ORGÂNICA

O aumento do consumo mundial no período pós-guerra trouxe o grande aumento do descarte de lixo por parte dos consumidores. O “lixo urbano”, antes composto por resíduos orgânicos, foi sendo substituído por embalagens plásticas, crescendo assustadoramente em volume.

Algumas sociedades entenderam o desafio da gestão de resíduos e iniciaram processos produtivos nos quais o “reciclar, reaproveitar, reusar” foram incorporados. Contribui também para a implementação deste comportamento o reconhecimento da ação humana como causadora do problema do Aquecimento Global.

Ainda assim, há uma enorme economia a ser desenvolvida na medida em que, ao se coletar, muito pode ser reciclado/reutilizado com bases econômicas. Isso reduz o custo logístico e diminui os volumes dos aterros. Após a disposição dos resíduos, há ainda muito a ser explorado economicamente.

O biogás é resultado de uma série de reações bioquímicas que degrada o material orgânico em ambientes sem oxigênio. Ele é um combustível renovável e descentralizado, perfeito para reduzir as emissões humanas brasileiras de gases de efeito estufa e mais resistente a eventuais mudanças nos padrões climáticos normais.

Em relação ao biogás de RSD, seu aproveitamento energético pode se dar por meio de duas tecnologias:

**Aterros sanitários** – Todo o material orgânico das cidades é depositado em aterros por meio de células fechadas. A partir daí, por meio de um sistema sem oxigênio, ele é transformado em biogás. Por meio de uma rede de tubos coletores, ele é capturado, tratado e utilizado para gerar energia, sendo que a forma mais comum é em motores de combustão interna.

**Biodigestores especializados** – Nela, o material orgânico é degradado em um ambiente controlado, gerando o biogás. Porém, diferentemente do aterro sanitário, aqui há uma triagem prévia do resíduo para que somente a parte orgânica seja tratada.

A biodigestão da fração orgânica contida no RSD é um processo fundamental para a transformação de um passivo ambiental em recurso energético e econômico. Esse processo não apenas reduz significativamente o volume de resíduos destinados a aterros sanitários, prolongando sua vida útil e diminuindo custos operacionais, mas também evita a emissão descontrolada de metano, um gás com alto potencial de efeito estufa. Ao capturar e converter esse gás em energia, a biodigestão oferece uma solução sustentável e alinhada com as demandas ambientais contemporâneas.

O biogás produzido na biodigestão, composto principalmente por metano e dióxido de carbono, pode ser utilizado de diversas formas, desde a geração de energia elétrica até o aquecimento industrial. No entanto, seu potencial aumenta ainda mais quando submetido a um processo de upgrading, que purifica o gás e o transforma em biometano e CO<sub>2</sub>. Esse combustível renovável possui qualidade equivalente ao gás natural veicular (GNV), permitindo sua injeção na rede de gás canalizado, uso em frotas municipais ou comercialização para indústrias. Essa versatilidade abre portas para novas fontes de receita, como a venda de energia limpa, a participação em mercados de créditos de carbono e a produção de fertilizantes orgânicos a partir do digestato.

Para o município de Marília, a implantação desse modelo representa um marco na gestão de resíduos, alinhando desenvolvimento econômico à sustentabilidade. A iniciativa posiciona a cidade como referência em inovação tecnológica e economia circular, atraindo investimentos e fortalecendo sua infraestrutura urbana. Além disso, a produção de biometano e CO<sub>2</sub> pode tornar Marília autossuficiente em energia limpa, reduzindo custos com combustíveis fósseis e criando oportunidades de negócios em um mercado em expansão.

Em resumo, a biodigestão da fração orgânica do RSD vai além da simples disposição adequada de resíduos; ela transforma um desafio ambiental em uma oportunidade econômica e energética. Para Marília, esse projeto não só moderniza a gestão de resíduos, mas também consolida um novo paradigma de desenvolvimento sustentável, onde o lixo deixa de ser um problema e se torna uma fonte de riqueza e inovação.

O mundo está passando por importantes transformações na área de energia. As energias renováveis ditas modernas, das quais fazem parte biocombustíveis (incluindo biogás), energia eólica e energia solar, se fortalecem ano após ano e demonstram crescimento robusto e acelerado, mesmo em momentos de crise econômica.

O aproveitamento energético da fração orgânica dos Resíduos Sólidos Domésticos (RSD) para geração de biogás é uma alternativa viável para minimizar os impactos sociais e ambientais causados pelo acúmulo e disposição destes resíduos nos aterros sanitários.

A digestão anaeróbia, sob condições controladas, tem por objetivo maximizar o rendimento e a qualidade do biogás produzido. Dentre os parâmetros controlados o pH, a alcalinidade, a concentração dos ácidos graxos voláteis e a temperatura de operação são fundamentais para a otimização do processo.

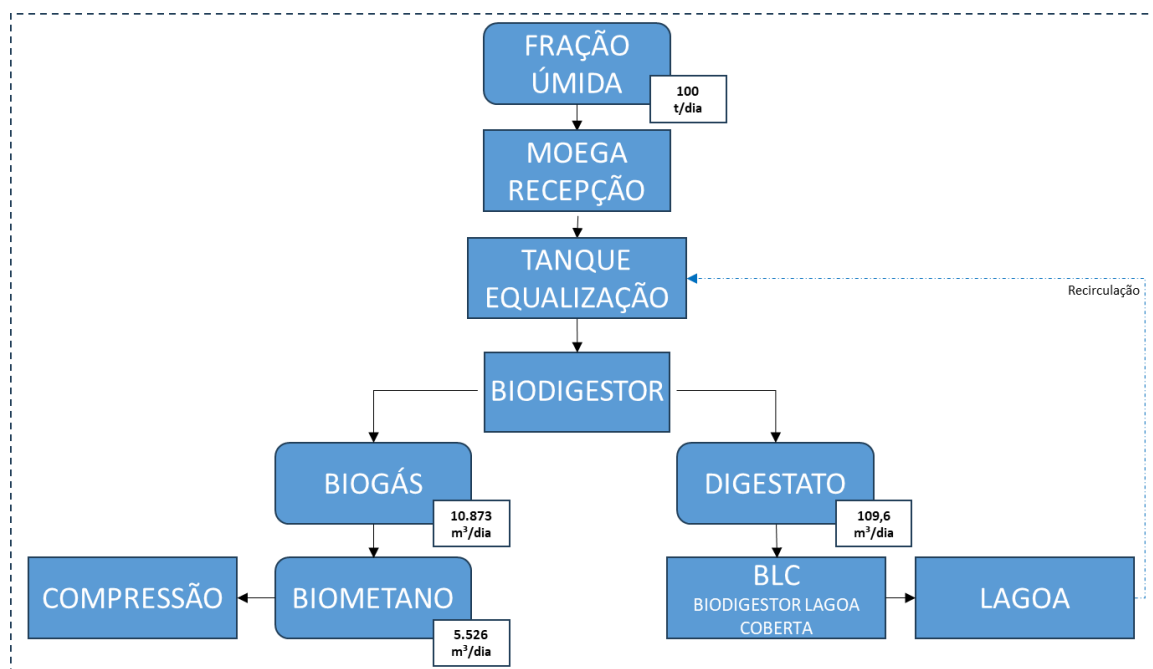


Figura 13: Fluxograma de Processo

O fluxo inicia com os Resíduos Sólidos Domésticos (RSD) sendo direcionados para uma etapa de Equalização, onde são homogeneizados para garantir um tratamento uniforme no processo seguinte. O material equalizado é então encaminhado ao Biodigestor, onde ocorre a digestão anaeróbia da matéria orgânica, resultando na produção de Biogás.

O biogás bruto segue para tratamento em uma Biorrefinaria (também conhecido como upgrading), onde é purificado e transformado em Biometano e CO<sub>2</sub>, combustíveis renováveis de alto valor energético. Durante esse processo, os efluentes são separados em:

- Fração Sólida: Destinada à Compostagem, convertendo-se em adubo orgânico.
- Fração Líquida: Processada para produção de Biofertilizante, rico em nutrientes para aplicação agrícola.

O Biometano produzido tem duas principais aplicações:

- Uso Automotivo: Como combustível veicular sustentável para frotas municipais ou transporte público.
- Uso Industrial: Para geração de energia térmica ou elétrica em processos industriais em substituição a combustíveis fósseis.

O CO<sub>2</sub> (Dióxido de Carbono) purificado tem diversas aplicações, incluindo:



- **Uso Industrial:** Como gás de refrigeração, matéria-prima para carbonatação de bebidas, ou para aplicações em estufas agrícolas, promovendo o crescimento de plantas.
- **Uso Hospitalar e Médico:** Como insumo em procedimentos médicos (ex.: laparoscopia e cirurgias minimamente invasivas), além de ser utilizado em atmosferas controladas para conservação de tecidos e medicamentos.
- **Uso Tecnológico e Comercial:** Na produção de dry ice (gelo seco) para conservação de alimentos, medicamentos e aplicações logísticas, além de ser utilizado em sistemas de extinção de incêndios.

Este sistema integrado não apenas valoriza os resíduos urbanos, transformando-os em produtos de alto valor agregado (biometano, CO<sub>2</sub>, composto e biofertilizante), mas também contribui para uma gestão mais sustentável dos RSD, alinhando-se aos princípios da economia circular. A presença da Lagoa no fluxograma sugere seu papel no armazenamento ou tratamento complementar de efluentes durante o processo.

## TRATAMENTO E VALORIZAÇÃO DO DIGESTATO

O processo de biodigestão anaeróbia gera, como subproduto o digestato. Para uma entrada de 100 toneladas por dia (t/d) de fração orgânica, estima-se uma produção de aproximadamente 109,6 m<sup>3</sup>/dia de digestato, conforme fluxograma do projeto. Este material, rico em nutrientes (nitrogênio, fósforo, potássio) e matéria orgânica estável, não é um rejeito, mas um recurso valioso que requer tratamento adequado para sua completa integração ao ciclo de economia circular da Usina de Recuperação Energética (URE). O manejo inadequado do digestato pode comprometer os ganhos ambientais do processo principal, gerando odores, emissões residuais de gases e potencial contaminação de solos e corpos hídricos.

Este sistema será composto por:

- Lagoa de Polimento (ou Lagoa Aerada Facultativa):

**Função:** Receber o digestato bruto do biodigestor. Esta primeira etapa tem como objetivo a estabilização secundária do material. A ação de microrganismos aeróbios e facultativos, potencializada por aeração mecânica opcional, promove a redução adicional da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), dos sólidos em suspensão e dos compostos orgânicos remanescentes. Este processo também inicia a redução de patógenos e uniformiza as características do material.

- Lagoa de Maturação:



Função: Receber o efluente da lagoa de polimento para a fase final de estabilização terciária e higienização. Operando em condições predominantemente aeróbias e com tempo de retenção hidráulico prolongado, a lagoa de maturação permite a sedimentação de sólidos finos, a mineralização avançada da matéria orgânica e, crucialmente, a redução de patógenos a níveis seguros para aplicação no solo, conforme diretrizes agronômicas e sanitárias. A ação da radiação solar (foto-desinfecção) nesta etapa é um fator natural complementar de desinfecção.

A adoção do sistema de lagoas confere as seguintes vantagens ao projeto:

- **Robustez e Baixo Custo Operacional:** Sistemas de lagoas são conhecidos por sua simplicidade operacional, alta tolerância a variações de carga e baixo consumo energético quando comparados a sistemas de tratamento físico-químico intensivos.
- **Eficiência Comprovada:** São tecnologia consolidada para o tratamento de efluentes de alta carga orgânica, efetivamente promovendo a estabilização e a remoção de nutrientes em excesso.
- **Produção de Biofertilizante Líquido Estabilizado:** O efluente final, após passagem pelas lagoas, estará transformado em um biofertilizante líquido de qualidade. Este produto, devidamente caracterizado e monitorado, poderá ser utilizado em programas de agricultura urbana, recuperação de áreas degradadas, paisagismo municipal ou comercializado para produtores rurais da região, fechando o ciclo dos nutrientes.
- **Conformidade Ambiental:** O sistema assegura que o digestato seja tratado antes de qualquer destinação, garantindo o cumprimento da legislação ambiental (ex.: Resolução CONAMA 375/2006 e 498/2020, que tratam de critérios para uso agrícola) e prevenindo passivos.
- **Segurança Hídrica:** O tratamento adequado evita a lixiviação de nitratos e a contaminação de lençóis freáticos, protegendo os recursos hídricos locais.

O sistema de tratamento do digestato será integralmente gerenciado pelo CONCESSIONÁRIO, que deverá:

- Projetar as lagoas com capacidade, tempos de retenção e sistemas de contenção (diques) adequados para a vazão projetada e para eventos climáticos extremos.
- Implementar programa de monitoramento contínuo da qualidade do digestato em diferentes etapas (bruto, após polimento, após maturação), com parâmetros como pH, condutividade, DBO, DQO, nutrientes (N, P, K) e indicadores de patógenos (ex.: coliformes termotolerantes, ovos de helmintos).
- Elaborar e executar um Plano de Aplicação Agronômica para o biofertilizante final, definindo doses, culturas e áreas aptas, em conformidade com a agronomia e a legislação.
- Garantir que não haja emissões odoríferas significativas a partir das lagoas, por meio de projeto adequado e eventual uso de coberturas ou biofiltros, se necessário.

Dessa forma, o capítulo da biodigestão se completa com a fração orgânica é transformada em biometano e CO<sub>2</sub> enquanto o digestato é convertido, por meio de um sistema natural e eficiente de lagoas, em biofertilizante (nutrientes), realizando plenamente os princípios da economia circular e aportando sustentabilidade socioambiental e econômica ao projeto da URE de Marília.

#### 6.4.4. **UPGRADING DE BIOGÁS PARA BIOMETANO**

O *upgrading* de biogás para biometano é um processo essencial para transformar o biogás bruto – composto principalmente por metano (CH<sub>4</sub>, 50-75%) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>, 25-50%), além de impurezas como sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S), umidade e partículas – em um combustível renovável de alta pureza, comparável ao gás natural veicular (GNV). O objetivo principal desse processo é elevar o teor de metano para acima de 95%, removendo contaminantes que prejudicam sua eficiência energética e aplicabilidade. O biometano resultante pode ser injetado na rede de gás natural, utilizado como combustível veicular ou empregado em processos industriais, contribuindo para a descarbonização e a economia circular.

##### **Principais Tecnologias de *Upgrading***

###### **1. Lavagem de Gases (Water Scrubbing)**

- Princípio: Utiliza água sob pressão para absorver seletivamente o CO<sub>2</sub> e o H<sub>2</sub>S, aproveitando a maior solubilidade desses gases em comparação ao CH<sub>4</sub>.
- Vantagens: Baixo custo operacional e simplicidade.
- Desafios: Requer tratamento da água contaminada e consome energia para compressão.

###### **2. Adsorção por Pressão Oscilante (PSA – Pressure Swing Adsorption)**

- Princípio: Empregam-se materiais adsorventes (como carvão ativado ou zeólitas) que retêm CO<sub>2</sub> e outros gases sob alta pressão, liberando metano puro. A redução da pressão regenera o adsorvente.
- Vantagens: Alta eficiência (até 99% de pureza de CH<sub>4</sub>) e adaptabilidade a diferentes vazões.
- Desafios: Custos elevados com adsorventes e energia para compressão.

###### **3. Separação por Membranas**

- Princípio: Membranas poliméricas ou cerâmicas separam os gases por diferença de permeabilidade. O CO<sub>2</sub> atravessa a membrana mais rapidamente que o CH<sub>4</sub>, que é coletado como produto.
- Vantagens: Modularidade, baixa manutenção e compatibilidade com biogás de pequena escala.
- Desafios: Sensibilidade a impurezas (H<sub>2</sub>S pode degradar membranas) e necessidade de pré-tratamento rigoroso.

#### 4. Processos Criogênicos

- Princípio: Resfriamento do biogás a temperaturas extremamente baixas para liquefazer e separar o CO<sub>2</sub> do CH<sub>4</sub>.
- Vantagens: Produz biometano de altíssima pureza e CO<sub>2</sub> líquido (passível de comercialização).
- Desafios: Alto consumo energético e custos operacionais elevados.

#### 5. Aplicações do Biometano

- Injeção na Rede de Gás: Atende residências e indústrias, substituindo gás natural fóssil.
- Combustível Veicular (BioGNV): Reduz emissões em frotas de ônibus e caminhões.
- Energia Industrial: Fornece calor ou eletricidade para processos produtivos sustentáveis.

O *upgrading* de biogás é um pilar da transição energética, convertendo resíduos em recursos valiosos. A escolha da tecnologia depende de fatores como escala, custos e pureza requerida. Com avanços tecnológicos, essas soluções tornam-se cada vez mais acessíveis, impulsionando cidades como Marília rumo à sustentabilidade e à independência energética.

### 6.4.5. UPGRADING DE BIOGÁS PARA DE CO<sub>2</sub>

O CO<sub>2</sub> (Dióxido de Carbono) capturado durante o processo de *upgrading* do biogás é um subproduto de alto valor agregado quando devidamente purificado. Originalmente presente no biogás bruto em concentrações de 25 a 50%, o CO<sub>2</sub> pode ser separado e tratado para atingir níveis de pureza superiores a 99%, adequados para aplicações industriais, comerciais e até médicas. Esse processo não apenas maximiza a eficiência do sistema de produção de biometano,

mas também evita a emissão de gases de efeito estufa, transformando um resíduo em insumo estratégico para múltiplos setores.

O CO<sub>2</sub> purificado pode ser:

- Comprimido para armazenamento e transporte em estado líquido ou gasoso;
- Liquefeito para produção de gelo seco (*dry ice*);
- Direcionado para mercados específicos, como alimentício, médico ou industrial.

Principais Tecnologias de Purificação de CO<sub>2</sub>:

1. Absorção por Aminas: Utiliza soluções químicas para capturar seletivamente o CO<sub>2</sub>.
2. Adsorção por Pressão Oscilante (PSA): Separa o CO<sub>2</sub> por meio de leitos adsorventes sob pressão variável.
3. Separação por Membranas: Filtra o CO<sub>2</sub> com membranas poliméricas de alta seletividade.
4. Liquefação e Destilação Criogênica: Condensa e purifica o CO<sub>2</sub> em baixas temperaturas.

Vantagens do Aproveitamento de CO<sub>2</sub>:

- Geração de receita adicional com a comercialização do CO<sub>2</sub> purificado;
- Redução do impacto ambiental do processo;
- Atendimento a demandas de setores críticos (ex.: refrigeração, carbonatação de bebidas, atmosferas controladas em hospitais).

Este processo consolida o conceito de economia circular na usina, garantindo que todos os fluxos de resíduos sejam valorizados economicamente e ambientalmente.

## 6.5. CRONOGRAMA DE IMPLANTAÇÃO

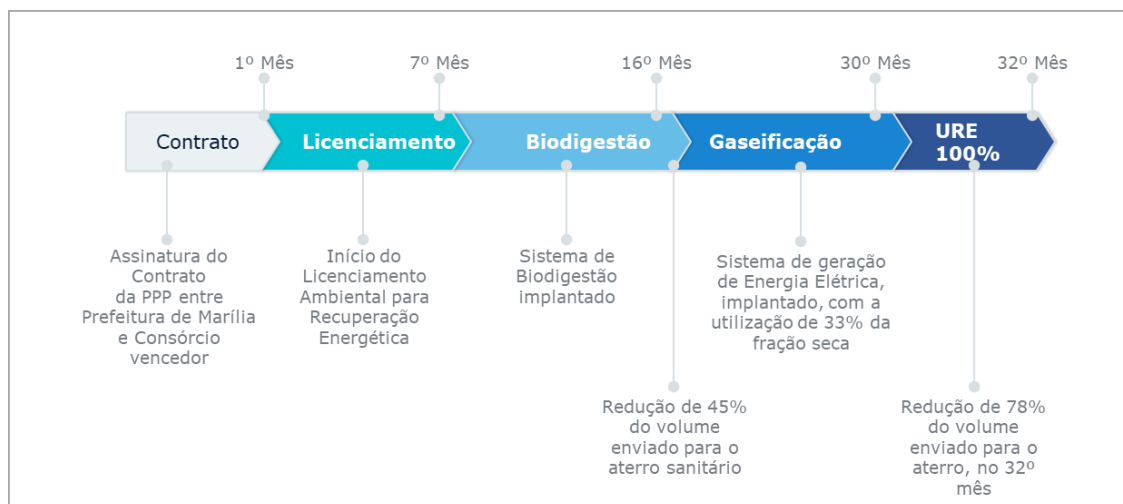


Figura 14: Cronograma de implantação da URE MARÍLIA

### 6.5.1. CONTRATO (MÊS 1)

- Evento: Assinatura do contrato da PPP entre a Prefeitura de Marília e o consórcio vencedor.
- Significado: Marco formal de início da parceria, estabelecendo direitos, obrigações e prazos para a implantação e operação do sistema.

### 6.5.2. LICENCIAMENTO

- Evento: Início do processo de licenciamento ambiental para a recuperação energética de resíduos.
- Significado: Etapa fundamental para obtenção das licenças ambientais necessárias (Prévia, de Instalação e de Operação), garantindo a conformidade legal e ambiental do projeto.

### 6.5.3. BIODIGESTÃO

- Evento: Implantação do sistema de biodigestão.

- Resultado Imediato: Redução de 45% da fração orgânica dos resíduos.
- Significado: A biodigestão processa a matéria orgânica, produzindo biogás (que pode ser convertido em energia), CO<sub>2</sub> e biofertilizante, além de reduzir significativamente o volume de resíduos destinados ao aterro.

#### **6.5.4. GASEIFICAÇÃO/PIRÓLISE**

- Evento: Implantação do sistema de geração de energia elétrica via gaseificação/pirólise.
- Capacidade: Utilização de 34% da fração seca dos resíduos sólidos urbanos.
- Significado: A gaseificação/pirólise converte a fração seca (como plásticos, papéis e outros materiais com alto poder calorífico) em gás de síntese (syngas), utilizado para gerar energia elétrica.

#### **6.5.5. METAS DE REDUÇÃO DE ENVIO PARA ATERRO**

- 15º Mês: Redução de 45% do volume de resíduos enviados para o aterro sanitário.
- 30º Mês: Redução de 34% do volume de resíduos enviados para o aterro sanitário.

Com a hipótese de implantação do sistema de biodigestão anaeróbica, em quinze meses, está prevista a redução de até 45% do volume de resíduos enviados ao aterro sanitário.

Já com a hipótese da instalação consorciada do sistema de gaseificação/pirólise, em trinta meses, a meta estabelecida corresponde à redução de mais 34% do volume destinado ao aterro, ou seja, aproximadamente 79 % de redução no volume de resíduos encaminhados para o aterro sanitário.

Cabe destacar, entretanto, que a efetivação dessas metas dependerá da decisão estratégica do Município de Marília no momento do certame. Assim, os percentuais de redução poderão ser alcançados integral ou parcialmente, de acordo com o cenário adotado: seja por meio da implantação conjunta das duas tecnologias previstas, o que possibilitaria maior eficiência no desvio de resíduos do aterro, ou pela adoção de apenas uma das tecnologias, caso se entenda ser a alternativa mais adequada ao contexto local.

## 6.5.6. ANÁLISE DO CRONOGRAMA

O cronograma demonstra uma estratégia de implantação gradual e eficiente.

1. Foco Imediato na Fração Orgânica: A prioridade é a biodigestão, que trata a parte mais problemática dos resíduos (orgânicos), responsável por geração de chorume e gases de efeito estufa em aterros.
2. Complementaridade Tecnológica: A gaseificação/pirólise complementa o sistema, tratando a fração seca e gerando energia adicional, maximizando a recuperação de recursos.
3. Metas Progressivas e Audíveis: As metas de redução para o aterro (45% em 15 meses e 79% em 30 meses) são objetivos claros e mensuráveis, que demonstram o compromisso com a sustentabilidade e a eficácia do sistema.
4. Alinhamento com a Economia Circular: O projeto transforma resíduos em energia, reduzindo a dependência de aterros sanitários e criando um ciclo de valor a partir do lixo.

## 7. NOVO MODELO DE GESTÃO DOS RESÍDUOS PROPOSTO

A transformação de resíduos sólidos domésticos em energia representa uma solução ambientalmente sustentável e economicamente vantajosa. Ao processar a matéria orgânica por meio da biodigestão anaeróbia, esse sistema não apenas elimina as emissões de metano – gás 28 vezes mais poluente que o CO<sub>2</sub>, gerado pela decomposição do lixo em aterros sanitários –, mas também produz biometano, um combustível renovável de alto valor energético e o CO<sub>2</sub> pode ser separado e tratado para atingir níveis de pureza superiores a 99%, adequados para aplicações industriais, comerciais e até médicas.

Complementarmente, a fração seca dos resíduos (como plásticos, papéis e tecidos) pode ser convertida em energia limpa através da gaseificação/pirólise. Esta tecnologia termoquímica transforma esses materiais, de difícil reciclagem, em um gás de síntese (syngas), utilizado para gerar energia elétrica ou térmica de alta eficiência. A gaseificação/pirólise, portanto, maximiza o aproveitamento do resíduo, desviando do aterro praticamente toda a parcela com potencial calorífico.

O biometano, CO<sub>2</sub> e a energia elétrica gerada surgem como alternativas limpas aos combustíveis fósseis, contribuindo diretamente para a descarbonização de setores estratégicos, como transporte, indústria e geração de energia. Sua utilização em veículos pesados (como ônibus e caminhões), injeção na rede de gás natural ou comercialização na rede elétrica reduz a

dependência de fontes poluentes, alinhando-se às metas globais de redução de emissões. Além disso, os processos geram subprodutos valiosos, como biofertilizantes da biodigestão e escória vitrificada (inerte e segura) da gaseificação/pirólise, fechando o ciclo da economia circular.

Para municípios como Marília, a integração dessas tecnologias representa um avanço triplo: solução ambiental definitiva para o passivo dos resíduos, oportunidade econômica por meio da comercialização de energia e combustível, e segurança energética local. A implantação de uma usina de recuperação energética que combine biodigestão e gaseificação/pirólise consolida um novo modelo de gestão de resíduos – mais eficiente, sustentável e alinhado com as demandas do século XXI.

Em síntese, o aproveitamento energético do resíduo urbano vai além da simples disposição adequada; é um investimento em energia limpa, qualidade ambiental e desenvolvimento regional.

Para escolher as melhores tecnologias a serem empregadas no município de MARÍLIA/SP optamos por uma vertente tecnológica que atue na minimização da poluição, melhore para a qualidade de vida dos munícipes, minimize os aspectos ambientais já existentes, garanta uma destinação ambientalmente correta, não gere mais passivos ambientais e que não contribua com a formação de vetores e doenças no Município de MARÍLIA.

Para o melhor atendimento à Política Nacional de Resíduos Sólidos e considerando as particularidades do Município de Marília, conclui-se que a estratégia ótima a ser adotada é a implantação de uma Usina de Recuperação Energética de Resíduos (URE). Esta usina receberá a totalidade dos resíduos domésticos coletados no município para tratamento e valorização, podendo operar a partir de duas frentes tecnológicas, implantadas de forma isolada ou em conjunto, conforme a estratégia definida pela Prefeitura:

a.) Rota da Biodigestão: Processamento da fração orgânica dos resíduos por meio de biodigestão anaeróbia, visando a produção de biometano – um combustível renovável de alto valor energético – produção de CO<sub>2</sub> adequados para aplicações industriais, comerciais e até médicas e a redução significativa das emissões de poluentes.

b.) Rota da Gaseificação/pirólise/Pirólise: Processamento da fração seca de alto poder calorífico (como plásticos, papéis e têxteis) por meio de gaseificação/pirólise/pirólise, para geração de energia elétrica, aproveitando o potencial calorífico desses materiais de difícil reciclagem mecânica.

A adoção integrada das duas rotas tecnológicas proporciona o máximo aproveitamento energético dos resíduos urbanos, representando a solução mais abrangente e sustentável. No entanto, cada tecnologia também pode ser implementada como um módulo independente,



oferecendo flexibilidade para que o poder público adote a solução que melhor se alinhe ao seu planejamento estratégico e viabilidade econômico-financeira.

A implantação da Usina de Recuperação Energética de Resíduos – URE deverá ser de responsabilidade do Concessionário a AQUISIÇÃO/LOCAÇÃO/ARRENDAMENTO e LICENCIAMENTO AMBIENTAL das áreas necessárias para tais atividades, devendo estar contemplados nos investimentos do Concessionário.

No novo modelo de gestão de resíduos para o Município de Marília, para utilização de cálculo neste estudo de modelagem técnico-operacional, adotou-se como base um quantitativo de 5.200 (CINCO MIL E DUZENTAS) toneladas mensais de resíduos sólidos domiciliares e com a operação de 26 (VINTE SEIS) dias de operação por mês, resultando no quantitativo diário de 200 (DUZENTAS) toneladas por dia de resíduos sólidos domésticos – RSD. Com tais premissas temos:

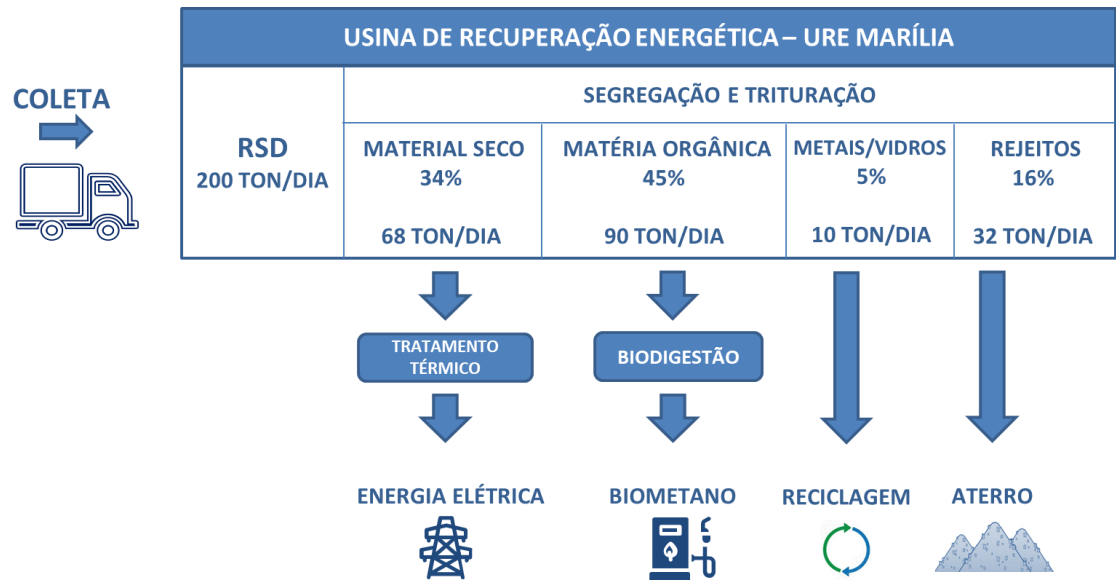


Figura 15: Novo modelo de gerenciamento de resíduos sólidos

NESTE NOVO CENÁRIO, 79% (SETENTA E NOVE POR CENTO) DOS RESÍDUOS POSSUEM POTENCIAL PARA RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA, TOTALIZANDO 158 (CENTO E CINQUENTA E OITO) TONELADAS/DIA. CONSEQUENTEMENTE, ESSE VOLUME EXPRESSIVO É DESVIADO DE ATERROS SANITÁRIOS, PROMOVENDO UMA DESTINAÇÃO MAIS SUSTENTÁVEL.

A URE MARÍLIA será destinada ao tratamento da fração orgânica dos resíduos estimada em 45% do total coletado, ou 90 (NOVENTE) toneladas/dia, por meio da biodigestão anaeróbia. O biogás resultante passará por um *upgrading* para conversão em biometano e CO<sub>2</sub>.

Quanto aos materiais secos estimados em 34%, ou 68 (SESSENTA E OITO) toneladas/dia compostos principalmente por plásticos, papéis, papelão, têxteis e outros materiais de alto poder

calorífico, estes serão valorizados via tratamento térmico para geração de energia elétrica. Diferentemente da reciclagem mecânica tradicional, que é limitada pela contaminação e baixa qualidade dos materiais, a solução termoquímica apresenta uma alternativa eficiente e energeticamente vantajosa para esses resíduos.

As demais frações dos resíduos sólidos urbanos poderão ter a seguinte destinação:

- Metais e vidros (5% – 10 toneladas/dia): destinação a cooperativas e indústrias especializadas em beneficiamento;
- Rejeitos (16% – 32 toneladas/dia): disposição final em aterro sanitário devidamente licenciado, observando-se as normas ambientais vigentes.

Com essas premissas para a futura Concessão, o objetivo é o tratamento de 100% dos resíduos sólidos domésticos coletados dentro da Usina de Recuperação Energética de Resíduos – URE MARÍLIA, visando uma redução substancial do volume aterrado.

A segregação deverá ser o máximo possível mecanizada e possuir equipamentos apropriados para a recepção, trituração, segregação e demais equipamentos necessários que proporcione uma segregação adequada para as frações prioritárias. Somente o rejeito desta operação será encaminhado para o aterro sanitário licenciado, conforme preconizado pela Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS - Lei Federal nº 12.305/2010, de 02 de agosto de 2010.

Tendo em vista que o município de MARÍLIA possui uma área onde antigamente funcionava o Aterro Sanitário Municipal, localizado na Rodovia Eduardo Zucari, Km 2,5 - MARÍLIA - SP; e que esta área está impactada ambientalmente, é indicado que o Concessionário construa a Usina de Recuperação Energética – URE MARÍLIA neste local e destine 100% da coleta para a URE.

Com vistas ao aprimoramento da gestão de resíduos sólidos urbanos e ao atendimento às diretrizes de sustentabilidade ambiental, apresenta-se a proposta de implantação de uma Usina de Aproveitamento Energético de Resíduos (URE) no município de Marília/SP.

A implementação da URE representa um avanço estratégico para o município, ao conjugar eficiência técnica, sustentabilidade econômica e responsabilidade socioambiental. Além de reduzir significativamente a quantidade de resíduos destinados a aterros, a proposta insere Marília em um patamar de referência na gestão integrada de resíduos sólidos urbanos.

No período inicial do contrato enquanto ainda não estiver implantada a URE pela Concessionária a Prefeitura Municipal de MARÍLIA deverá encaminhar os resíduos para o Aterro Sanitário.

## 7.1. VANTAGENS DO NOVO MODELO PROPOSTO

### 7.1.1. VANTAGENS ECONÔMICAS

De acordo com a Lei Municipal nº 9.278, de 26 de junho de 2025, que aprovou a revisão do Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, o Município de Marília possui contrato com a empresa Revita Engenharia S.A. para a destinação final dos resíduos coletados. O volume estimado é de 6.000 (SEIS MIL) toneladas por mês, o que equivale a 72.000 (SETENTA E DUAS MIL) toneladas por ano. Porém a municipalidade atualizou o volume de geração para 62.400 (SESSENTA E DUAS MIL E QUATROCENTAS ) toneladas por ano.

Para fins de cálculo deste estudo de modelagem técnico-operacional, adotou-se como base um quantitativo de 5.200 (CINCO MIL E DUZENTAS) toneladas mensais de resíduos sólidos domiciliares e com a operação de 26 (VINTE SEIS) dias de operação por mês, resultando no quantitativo diário de 200 (DUZENTAS) toneladas por dia de resíduos sólidos domésticos – RSD.

Outra premissa levada em consideração de acordo com a notícia pública de 2019 é o custo de R\$ 108,33 (CENTO E OITO REAIS E TRINTA E TRÊIS CENTAVOS) para o tratamento e transporte de 100% dos resíduos sólidos urbanos coletados no Município de Marília (<https://marilianoticia.com.br/com-novo-aterro-marilia-deixa-de-gastar-com-transbordo>).

Com essas premissas temos:

#### 1. Cenário Atual (100% dos resíduos destinados ao aterro sanitário)

- Quantidade anual de RSU destinada ao aterro: 62.400 toneladas/ano
- Custo de disposição no aterro: R\$ 108,33/tonelada
- Custo total anual com aterro:
- $62.400 \text{ ton/ano} * R\$ 108,33/\text{ton} = R\$ 6.759.792,00/\text{ano}$

#### 2. Cenário com Implantação da Biodigestão

- Redução de 45% da massa de RSU (fração orgânica) destinada ao aterro:
- $62.400 \text{ ton/ano} * 45\% = 28.080 \text{ ton/ano}$  desviadas do aterro
- Massa restante destinada ao aterro:
- $62.400 \text{ ton/ano} - 28.080 \text{ ton/ano} = 34.320 \text{ ton/ano}$
- Custo anual com aterro:
- $34.320 \text{ ton/ano} * R\$ 108,33/\text{ton} = R\$ 3.717.885,60/\text{ano}$
- Economia anual gerada pela biodigestão:
- $\text{Custo Atual} - \text{Custo} = R\$ 6.759.792,00 - R\$ 3.717.885,60 =$   
\*\*R\$ 3.041.906,40/ano\*\*

#### 3. Cenário Consorciada com Implantação da Gaseificação/Pirólise



- Redução adicional de 33% da massa de RSU (fração seca) destinada ao aterro:
- $62.400 \text{ ton/ano} \times 33\% = 20.592 \text{ ton/ano}$  desviadas do aterro
- Massa total desviada do aterro (Orgânico + Seco):
- $28.080 \text{ ton/ano} + 20.592 \text{ ton/ano} = 48.672 \text{ ton/ano}$  (78% do total)
- Massa restante de rejeitos destinada ao aterro ( $100\% - 78\% = 22\%$ ):
- $62.400 \text{ ton/ano} \times 22\% = 13.728 \text{ ton/ano}$
- Custo anual com aterro:
- $13.728 \text{ ton/ano} \times \text{R\$ } 108,33/\text{ton} = \text{R\$ } 1.487.154,24/\text{ano}$
- Economia anual total gerada pela URE (Biodigestão + Gaseificação/Pirólise):
- Custo Atual - URE =  $\text{R\$ } 6.759.792,00/\text{ano} - \text{R\$ } 1.487.154,24 =$   
\*\*R\$ 5.272.637,76/ano\*\*

## RESUMO DOS RESULTADOS

Indicador	Cenário Atual (Aterro)	Cenário Fase 1 (Biodigestão)	Cenário Fase 2 (URE Completa)
Massa Anual de RSU (ton/ano)	62.400	62.400	62.400
Massa Destinada ao Aterro (ton/ano)	62.400	34.320	13.728
Percentual de Redução no Aterro	0%	45%	78%
Custo com Aterro (R\$/ano)	R\$6.759.792,00	R\$3.717.885,60	R\$1.487.154,24
Economia Anual (R\$/ano)	-	R\$3.041.906,40	R\$5.272.637,76
Massa Tratada por Tecnologia (ton/ano)	0	28.080	48.672

Tabela 3: Resumo dos resultados

## Conclusão:

A implantação da URE proporciona uma economia financeira crescente conforme as tecnologias são implementadas. Com a tecnologia da Biodigestão Anaeróbica, a economia é de aproximadamente R\$ 3 milhões/ano. Já com as tecnologias de Gaseificação/Pirólise em operação plena, a economia salta para mais de R\$ 5,2 milhões/ano, reduzindo a massa destinada ao aterro e os custos de disposição final em 78%, transformando um custo operacional em oportunidade de investimento em energia verde.

A análise dos cenários demonstra que a implantação progressiva da Usina de Recuperação Energética (URE) traz impacto econômico transformador quando avaliada em um horizonte de 30 anos – prazo típico de concessões para gestão de resíduos.

Resumo do Impacto Financeiro		
Cenário	Economia Anual (R\$)	Economia em 30 Anos (R\$)
Biodigestão Anaeróbica	R\$3.041.906,40	R\$91.257.192,00
Gaseificação/Pirólise	R\$5.272.637,76	R\$158.179.132,80

Tabela 4: Resumo do Impacto Financeiro para 30 anos

Em uma perspectiva de concessão de 30 anos, a implantação da URE não é apenas uma opção técnica e ambientalmente adequada, mas sim uma estratégia financeira robusta. A economia de centenas de milhões de reais, associada à geração de novas receitas e à mitigação de riscos futuros, transforma o passivo dos resíduos sólidos em um ativo econômico e ambiental de longo prazo, garantindo a sustentabilidade do serviço público.

É importante ressaltar que todos os valores financeiros apresentados neste estudo são referenciais, baseados em projeções e premissas de custo vigentes. Na prática, esses valores poderão sofrer alterações devido a fatores como indexação de contratos, variações no custo de operação dos aterros, inflação e condições específicas de mercado.

### 7.1.2. VANTAGENS SOCIAIS

- **Geração de Emprego e Renda:** A implantação e operação de uma usina desse porte criam empregos diretos (engenheiros, técnicos, operadores) e indiretos (serviços de manutenção, transporte, comércio local), movimentando a economia do município e promovendo qualificação profissional em uma área de ponta da economia verde.
- **Fomento à Educação Ambiental:** A usina se torna um centro de referência e um instrumento prático de educação ambiental para a população, escolas e universidades, conscientizando sobre a importância da segregação dos resíduos, reciclagem e sustentabilidade.
- **Melhoria da Saúde Pública:** Ao reduzir significativamente o volume de resíduos destinado ao aterro, diminui-se também o potencial foco de atração de vetores de doenças (como ratos, baratas e moscas), contribuindo para a salubridade do entorno do aterro e melhorando a qualidade de vida da população.
- **Valorização da Imagem do Município:** Marília se posicionaria como uma cidade inovadora, sustentável e comprometida com as futuras gerações, atraindo investimentos e projetando uma imagem positiva perante o estado e o país.



Além dos aspectos sociais já citados, com a implantação Usina de Recuperação Energética de Resíduos - URE no Município de MARÍLIA para a recepção de 100% dos resíduos domésticos coletados, destacamos os aspectos sociais com a geração de 80 (OITENTA) empregos diretos e 240 (DUZENTOS E QUARENTA) empregos indiretos, bem como a geração de tributos e a efetiva redução de custos significativa para a prestação de serviços no tratamento dos resíduos sólidos.

### 7.1.3. VANTAGENS AMBIENTAIS

Além da expressiva vantagem econômica caracterizada pela redução de custos com a disposição final em aterro sanitário, a implantação da Usina de Aproveitamento de Resíduos com a biodigestão da fração orgânica traz benefícios ambientais redução da poluição do solo e da água:

- A destinação inadequada do lixo orgânico em aterros é a principal fonte de chorume, um líquido altamente poluente que, se não tratado corretamente, pode contaminar o solo e os lençóis freáticos. A biodigestão desvia esse resíduo, drasticamente reduzindo a geração desse efluente e, conseqüentemente, o risco de contaminação ambiental.
- Diminuição das emissões de gases de efeito estufa: Em um aterro sanitário, a matéria orgânica decompõe-se anaerobicamente, liberando gás metano (CH<sub>4</sub>) diretamente na atmosfera. O metano é um gás com um potencial de aquecimento global 25 vezes maior que o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). No biodigestor, esse mesmo processo de decomposição anaeróbia é controlado e otimizado, capturando o biogás para geração de biometano, impedindo que ele seja lançado na atmosfera e contribuindo diretamente para o combate às mudanças climáticas.
- Geração de Combustível Renovável: O biogás produzido é uma fonte de energia limpa e renovável que pode ser utilizada para gerar biometano para abastecer a frota de veículos municipais, como caminhões, reduzindo o uso de combustíveis fósseis.
- Produção de Biofertilizante: O resíduo sólido resultante do processo de biodigestão, chamado de digestato, é um material estabilizado, rico em nutrientes, que pode ser tratado e transformado em um fertilizante orgânico de alta qualidade. Este biofertilizante pode ser utilizado em parques, jardins públicos, agricultura e reflorestamento, fechando o ciclo nutritivo e reduzindo a dependência de fertilizantes químicos.

#### 7.1.4. VANTAGENS OPERACIONAIS

A implantação de uma Usina de Recuperação Energética (URE) com foco na biodigestão da fração orgânica dos resíduos sólidos urbanos não é apenas uma medida ambientalmente correta, mas representa um salto significativo em eficiência operacional

Como vantagens operacionais para o município de MARÍLIA, destacamos:

- Melhoria na gestão de resíduos: O município deixa a gestão arcaica dos resíduos e contrata uma empresa especializada para atuar com uma gestão moderna que irá valorizar e aproveitar energeticamente os resíduos do Município de MARÍLIA, diminuindo assim a quantidade de resíduos a serem dispostos em aterros sanitários e atuando de forma ambientalmente correta, cumprindo efetivamente a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS.
- Estabilização e Previsibilidade de Custos: A operação de um aterro está sujeita a uma série de variáveis de custo complexas, como a taxação por tonelada, a manutenção de sistemas de tratamento de chorume. Ao reduzir drasticamente o volume destinado ao aterro, a prefeitura transforma um custo variável e potencialmente crescente em um custo fixo, mais previsível e controlável, facilitando o planejamento orçamentário anual.
- Simplificação da Logística: A usina funciona como um centro de tratamento e valorização dentro ou próximo ao município. Isso pode reduzir a distância percorrida pelos caminhões para a disposição final, diminuindo custos com combustível, manutenção da frota e horas de trabalho, além de reduzir o desgaste da malha viária e o tráfego de veículos pesados.

#### 7.1.5. VANTAGENS DA EFICIÊNCIA NO EMPREGO DE RECURSOS PÚBLICOS

- Transformação de Despesa em Investimento: Atualmente, o dinheiro público gasto com a taxa de disposição em aterro é uma despesa líquida, sem retorno algum. Com a URE, parte significativa desse mesmo recurso pode ser realocada para um sistema que gera produtos com valor econômico (energia, biometano, CO<sub>2</sub> e biofertilizante), transformando um custo operacional em um investimento em infraestrutura produtiva.
- Geração de Receita e Autofinanciamento: A venda de biometano para a rede de gás natural ou a utilização para abastecer a frota própria (substituindo a compra de diesel) e a venda de CO<sub>2</sub> gera economia direta e potencial receita. Da mesma forma, a

comercialização do biofertilizante pode criar um fluxo de caixa adicional. Esses ganhos podem ser reinvestidos na própria operação da usina, melhorando os serviços de limpeza urbana ou até mesmo subsidiando outras áreas essenciais, como saúde e educação, maximizando o retorno social do recurso aplicado.

- **Otimização do Ciclo Orçamentário:** A economia anual de milhões de reais, como os R\$ 3 milhões por ano citados no exemplo, libera uma verba substancial no orçamento municipal. Esses recursos, que antes eram destinados a simplesmente "enterrar" um problema, podem realocados de forma estratégica para outras prioridades, como investimento em novas frotas de coleta seletiva, programas sociais, pavimentação ou iluminação pública, resultando em um benefício tangível direto para a população.
- **Cumprimento de Legislação e Redução de Riscos:** A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) determina o fim da disposição de resíduos recicláveis e reutilizáveis em aterros. A usina coloca o município em conformidade com a lei, evitando multas, embargos e passivos ambientais futuros, que representam custos judiciais e reparações que seriam pagos com dinheiro público.

## 7.2. BALANÇA DE MASSA EMPREENDIMENTO

O balanço de massa é uma ferramenta fundamental da engenharia que quantifica todos os fluxos de entrada e saída de materiais em um processo, garantindo que a massa total seja conservada. Ele demonstra a eficiência do sistema em transformar resíduos em produtos de valor agregado.

De acordo com a Lei Municipal nº 9.278, de 26 de junho de 2025, que aprovou a revisão do Plano de Gestão Integrada de Resíduos Sólidos, o Município de Marília possui contrato com a empresa Revita Engenharia S.A. para a destinação final dos resíduos coletados. O volume estimado é de 6.000 (SEIS MIL) toneladas por mês, o que equivale a 72.000 (SETENTA E DUAS MIL) toneladas por ano. Porém a municipalidade atualizou o volume de geração para 62.400 (SESSENTA E DUAS MIL E QUATROCENTAS ) toneladas por ano.

Para fins de cálculo deste estudo de modelagem técnico-operacional, adotou-se como base um quantitativo de 5.200 (CINCO MIL E DUZENTAS) toneladas mensais de resíduos sólidos domiciliares e com a operação de 26 (VINTE SEIS) dias de operação por mês, resultando no quantitativo diário de 200 (DUZENTAS) toneladas por dia de resíduos sólidos domésticos – RSD.

A população estimada para o Município de Marília em 2024, conforme IBGE foi de 246.627 (DUZENTOS E QUARENTA E SEIS MIL, SEISCENTOS E VINTE E SETE) habitantes (<https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sp/marilia.html>), o que representa uma geração per capita de 0, 811 (OITOCENTOS E ONZE) kg/habitante/dia.



Este capítulo tem como objetivo apresentar e esclarecer o balanço de massa e energético referencial da Usina de Recuperação Energética (URE), baseado na capacidade nominal de processamento de 200 toneladas por dia (t/d) de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). As informações aqui contidas visam sanar eventuais insuficiências técnicas e estabelecer uma base clara e transparente para a concepção, licitação e futura operação do empreendimento, sem, contudo, exaurir a capacidade inovadora do Concessionário.

Com base em caracterizações de resíduos sólidos urbanos (RSU) típicas da região e no fluxograma fornecido, estabelece-se o seguinte fluxo de processamento:

- Entrada Total de RSU: 200 t/d
- Triagem e Segregação Inicial:
  - Materiais Recicláveis (Metais, Vidros): 10 t/d (encaminhados para reciclagem).
  - Fração Úmida (Orgânica): 90 t/d (encaminhada para biodigestão anaeróbia).
  - Fração Seca Combustível (para CDR - Combustível Derivado de Resíduos): 68 t/d (encaminhada para tratamento térmico).
  - Rejeitos: 32 ton/dia (destinação final ambientalmente adequada).

Processamento por Biodigestão Anaeróbia (Entrada: 90 t/d de orgânicos):

- Biometano ( $\text{CH}_4$ ) produzido: 5.400  $\text{Nm}^3/\text{dia}$ .
- Digestato (biofertilizante): 54  $\text{m}^3/\text{dia}$ .
- $\text{CO}_2$  do Biogás (separado no upgrading): 5 t/d (potencialmente capturado para uso ou armazenamento).
- Processamento por Tratamento Térmico (Entrada: 68 t/d de CDR):
  - Gás de Síntese (Syngás) produzido: Volume variável conforme tecnologia (Gaseificação ou Pirólise).
  - Cinzas/Resíduos do processo: 3,4 a 6,8 t/d (estimativa de ~5 a 10% da massa de entrada, sujeitas a tratamento).

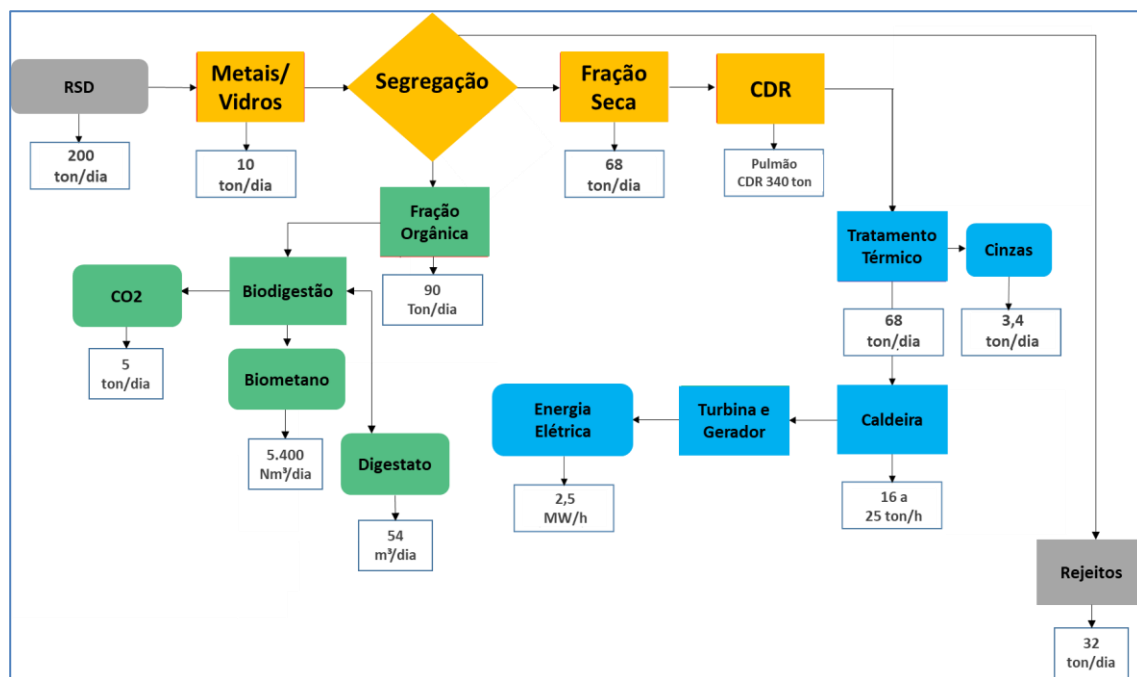


Figura 16: Balanço de massa do empreendimento

### 7.3. PREMISSAS TÉCNICAS E BALANÇO ENERGÉTICO

A estimativa de geração de energia apresentada deriva das seguintes premissas técnicas e fatores de eficiência:

#### 7.3.1. CARACTERÍSTICAS DO COMBUSTÍVEL (RSU/CDR)

- Poder Calorífico Inferior (PCI) do RSU "in natura": Estimado entre 1.800 a 2.200 kcal/kg (7,5 a 9,2 MJ/kg), variando com a composição sazonal.
- Poder Calorífico Inferior (PCI) do CDR Processado: Após triagem e secagem, estima-se um PCI entre 3.000 a 3.800 kcal/kg (12,5 a 15,9 MJ/kg), adequado para processos térmicos eficientes.

#### 7.3.2. EFICIÊNCIAS DOS PROCESSOS

- Biodigestão Anaeróbia:

- Eficiência de Conversão da Matéria Orgânica em Biogás: Espera-se um rendimento de 80 a 120 Nm<sup>3</sup> de biogás por tonelada de resíduo orgânico.
- Teor de Metano (CH<sub>4</sub>) no Biogás Bruto: 55% a 65%.
- Eficiência do Sistema de Upgrading para Biometano: ≥ 96% de pureza de CH<sub>4</sub>, com eficiência de recuperação de metano acima de 98%.
- Tratamento Térmico (Gaseificação/Pirólise):
  - Eficiência de Conversão do CDR em Syngás (Gaseificação): Rendimento esperado na faixa de 70% a 85% do poder calorífico do insumo convertido em energia química do syngás.
  - Poder Calorífico do Syngás: Variável conforme processo, estimado entre 1.000 a 1.500 kcal/Nm<sup>3</sup> (4,2 a 6,3 MJ/Nm<sup>3</sup>).
- Geração de Energia Elétrica:

Tecnologia	Eficiência elétrica líquida
------------	-----------------------------

- |   |           |
|---|-----------|
| ○ Motogeradores / Microturbinas             | 30% – 35% |
| ○ Ciclo Rankine (caldeira + turbina)        | 14% – 25% |
| ○ Ciclo combinado (turbina a gás + Rankine) | 38% – 45% |

### 7.3.3. GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA PROJETADA

Com base no fluxo de massa apresentado, que indica uma geração de 2,5 MWh, e considerando as premissas acima, temos:

- Geração de Energia Bruta Indicada: 2,5 MWh (produção em uma hora de operação à plena carga).

## 7.4. FLEXIBILIDADE TECNOLÓGICA E INOVAÇÃO

O modelo apresentado constitui uma configuração técnica referencial e não exaustiva. Reconhecendo a rápida evolução das tecnologias de conversão energética de resíduos, fica expressamente estabelecido que o CONCESSIONÁRIO poderá, em sua proposta técnica e no projeto executivo, propor quaisquer alternativas, arranjos tecnológicos ou processos complementares que julgue necessários para melhorar a eficiência global da URE.

Isso inclui, mas não se limita a:

- Otimização dos percentuais de segregação e qualidade do CDR.
- Seleção da tecnologia de tratamento térmico mais adequada (gaseificação, pirólise, ou combinação).
- Integração de sistemas para maximizar a recuperação de calor (cogeração).
- Incorporação de tecnologias de captura e uso de carbono (CCU).
- Sistemas avançados de automação e controle para eficiência operacional.

O desempenho final da URE será aferido com base nos indicadores de desempenho e metas contratuais (ex.: tonelagem processada, geração de energia, redução de rejeitos para aterro), e não pela estrita aderência ao fluxograma referencial, desde que todas as licenças ambientais e normas técnicas sejam integralmente atendidas.

## 8. INVESTIMENTOS

Os investimentos totais estimados para a implantação, operação e manutenção integral da Usina de Recuperação Energética (URE) de Marília, conforme apresentados nos estudos de viabilidade preliminares, possuem caráter estritamente referencial. Tais valores foram calculados com base em tecnologias e soluções técnicas diversas, servindo como parâmetro inicial para a análise econômico-financeira do projeto e para o estabelecimento do limite de garantia de proposta.

Os investimentos totais previstos para o concessionário privado vencedor para a implantação, operação e manutenção integral da Usina de Reaproveitamento Energético (URE) de Marília, com capacidade para receber e tratar 100% dos resíduos sólidos domésticos do município, foram estimados:

- 1. Cenário com Implantação da Biodigestão:** Estimado um total de R\$ 46.500.000,00 (QUARENTA E SEIS MILHÕES E QUINHENTOS MIL REAIS).
- 2. Cenário com Implantação da Gaseificação/Pirólise:** Estimado um total de R\$ 55.000.000,00 (CINQUENTA E CINCO MILHÕES DE REAIS).
- 3. Cenário com Biodigestão + Gaseificação/pirólise:** Estimado um total de R\$ 101.5000,00 (CENTO E UM MILHÕES E QUINHENTOS MIL REAIS)



É fundamental destacar que estes valores não constituem um teto, piso ou valor obrigatório a ser seguido pelo licitante vencedor. O CONCESSIONÁRIO terá plena liberdade técnica e econômica para estruturar sua proposta de investimento, podendo apresentar valores superiores ou inferiores aos apresentados, desde que demonstre, de forma robusta e detalhada em sua Proposta Técnica, a viabilidade e a superioridade de sua solução.

A variação nos valores de CAPEX pode decorrer de diversos fatores, que serão analisados no julgamento das propostas, tais como:

- Seleção Tecnológica Específica: Escolha de fornecedores, marcas e modelos de equipamentos com diferentes níveis de automação, eficiência e custo.
- Arranjos e Eficiências Projetuais: Inovação no layout, integração de processos, soluções de engenharia que otimizem custos ou, ao contrário, incorporem redundâncias para maior confiabilidade.
- Escopo Ampliado ou Otimizado: Inclusão de sistemas complementares não previstos inicialmente (ex.: sistemas avançados de tratamento de efluentes, captura de CO<sub>2</sub>) ou, alternativamente, otimizações que reduzam a necessidade de obras civis ou de infraestrutura.
- Estratégia de Implantação: Cronograma de desembolso, fases de construção e estratégia de suprimentos que impactem o custo de capital.

Portanto, o valor final do investimento será aquele proposto e contratualmente assumido pelo Concessionário vencedor, desde que atenda integralmente às especificações técnicas, aos padrões de desempenho, aos prazos e às metas obrigatórias estabelecidos no Edital e no Contrato de Concessão. A análise das propostas considerará a relação custo-benefício, a sustentabilidade técnica e financeira do empreendimento e a garantia da prestação do serviço público com qualidade, eficiência e segurança ao longo de todo o prazo contratual.

A estrutura proposta sob o modelo de Parceria Público-Privada (PPP) ou Concessão é altamente vantajosa para o Município de Marília. Todo o investimento de capital (CAPEX) e os riscos inerentes à construção e à eficiência tecnológica são assumidos integralmente pela Concessionária Privada. O poder público, por sua vez, se compromete com uma contraprestação vinculada ao cumprimento de metas operacionais e à entrega dos serviços contratados, assegurando a transferência de tecnologia e a operação de um ativo moderno sem a necessidade de investimento inicial pelo erário municipal.

A orçamentação foi baseada em pesquisas de mercado e orçamentos referenciais para projetos de médio porte. Seguem os investimentos estimados para implantação de uma Usina de Recuperação Energética com produção de energia elétrica, biometano e CO<sub>2</sub> no Município de Marília. Os valores apresentados são referenciais e poderão sofrer alterações na prática, conforme cotação de equipamentos, custos de construção e condições específicas do terreno.

## **8.1. GALPÃO INDUSTRIAL**

Galpão Industrial para Recepção e Processamento do RSU: com aproximadamente 2.000 m<sup>2</sup> (DOIS MIL METROS QUADRADOS) com cobertura, fechamento lateral e piso industrial e portões, para a recepção do RSU, pré-armazenamento e proteção dos equipamentos contra intempéries. Investimento Estimado: R\$ 8.000.000,00 (OITO MILHÕES DE REAIS).

## **8.2. SISTEMA DE TRITURAÇÃO E SEGREGAÇÃO DE RSU**

Sistema de Trituração e Segregação Mecânica do RSU: Moega de recepção, abre-sacos, estação de seleção, com sugestão de equipamentos como *trommel*, *shredder* (trituradores de alto torque), extração de metais, peneiras e esteiras transportadoras. Investimento Estimado: R\$ 10.000.000,00 (DEZ MILHÕES DE REAIS).

## **8.3. SISTEMA DE GASEIFICAÇÃO OU PIRÓLISE**

O sistema de gaseificação ou pirólise para o aproveitamento energético da fração seca do RSU: Moega de alimentação, sistema de pré-processamento (secagem), reator de gaseificação ou pirólise, sistema de limpeza de gases, caldeira de recuperação de calor, turbina a vapor para geração de energia elétrica e sistemas de controle e automação integrados. Investimento Estimado: R\$ 55.000.000,00 (CINQUENTA E CINCO MILHÕES DE REAIS).

## **8.4. SISTEMA DE BIODIGESTÃO**

Sistema de Biodigestão Anaeróbia: Pré-tratamento, biodigestores anaeróbios de alto rendimento, sistema de aquecimento, misturadores, bombas de alimentação, dutos interligados, casa de bombas e controle (PLC), flare para queima de biogás emergencial. Investimento Estimado: R\$ 15.000.000,00 (QUINZE MILHÕES DE REAIS).

## **8.5. SISTEMA DE UPGRADING PARA BIOMETANO**

Sistema de Upgrading (Purificação) de Biogás para Biometano: Equipamento para limpeza e purificação (melhor tecnologia existente, podendo ser: PSA - Pressão Swing Adsorption ou Membranas) para remover CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S e umidade, elevando o biogás a mais de 96% de pureza de metano (Biometano - BioGNV). Investimento Estimado: R\$ 5.500.000,00 (CINCO MILHÕES E QUINHENTOS MIL REAIS).

## **8.6. SISTEMA DE COMPRESSÃO E ABASTECIMENTO**

Sistema de Compressão, Abastecimento e Armazenamento: Compressor de alta pressão, bancada de cilindros para armazenamento (vasos de pressão) ou sistema para conexão e injeção na rede de gás, posto de abastecimento para veículos. Investimento Estimado: R\$ 3.000.000,00 (TRES MILHÕES DE REAIS).

## **8.7. SISTEMA DE UPGRADING PARA CO<sub>2</sub>**

Equipamento para captura, purificação de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), utilizando tecnologia de ponta, para remover impurezas residuais e umidade, elevando o CO<sub>2</sub> a um grau de pureza superior a 99,9%. O produto final pode ser armazenado e comercializado na forma líquida (CO<sub>2</sub> líquido) ou sólida (gelo seco - dry ice). Investimento Estimado: R\$5.000.000,00 (CINCO MILHÕES REAIS).

Cabe ressaltar que o montante de investimento detalhado anteriormente já incorpora todas as despesas relacionadas aos sistemas e processos críticos para a operação. Estão devidamente incluídos os custos com o sistema de automação e controle, o completo sistema de emergência e combate a incêndio, toda a infraestrutura elétrica, a balança rodoviária industrial, a infraestrutura de apoio (edificações), as taxas e consultorias para o licenciamento ambiental, bem como o desenvolvimento de todos os projetos de engenharia necessários. Portanto, o valor total apresentado é definitivo para este escopo.

## **9. VIDA ÚTIL DO EMPREENDIMENTO E ESTRATÉGIA DE INVESTIMENTO**

A garantia da continuidade operacional e da sustentabilidade econômico-financeira do projeto ao longo de todo o prazo da concessão é um pilar fundamental do modelo proposto. Para tanto, é estabelecida uma estratégia clara de gestão de ativos que considera a vida útil dos equipamentos e prevê os investimentos necessários para sua reposição e modernização.

### **9.1. VIDA ÚTIL DOS PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS**

A vida útil dos sistemas que compõem a Usina de Recuperação Energética varia conforme a natureza do componente, a criticidade de sua operação e os avanços tecnológicos. É importante

destacar que a vida útil efetiva dos equipamentos está diretamente condicionada a fatores operacionais e de gestão, tais como:

- A qualidade e regularidade da manutenção preventiva e preditiva;
- A prontidão e eficácia da manutenção corretiva;
- As condições e procedimentos de operação (carga, regime de trabalho, qualificação dos operadores);
- O ambiente de instalação (temperatura, umidade, agressividade química);
- A gestão de obsolescência tecnológica e a capacidade de atualização de sistemas.

Considerando estas variáveis, e com base em padrões de mercado e fabricantes, estimam-se os seguintes ciclos de vida útil para os principais equipamentos:

- Equipamentos Estruturais e de Longa Duração (Galpão, Obras Civas, Dutos): 20 (VINTE) a 30 (TRINTA) anos.
- Sistemas Principais de Processo (Biodigestores, Sistema de Upgrading Biometano e CO<sub>2</sub>, Sistema de Automação): 15 (QUINZE) a 20 (VINTE) anos.
- Sistema de Geração de Energia Elétrica (reator de gaseificação/pirólise, caldeira de recuperação de calor, trocadores de calor, sistema de limpeza de gás/syngas e turbina a gás): 20 (VINTE) anos.
- Equipamentos Eletromecânicos e de Movimentação (Trituradores, Esteiras, Pá-carregadeira, Bobcat, Compressores): 7 (SETE) a 12 (DOZE) anos.
- Componentes de Tecnologia e Software (CLPs, Sensores, Sistemas de Controle): 5 (CINCO) a 8 (OITO) anos (sujeitos a obsolescência tecnológica).





### **9.1.1. GESTÃO DO CICLO DE VIDA NO ÂMBITO DA CONCESSÃO DE 30 ANOS**

Considerando que o Contrato de Concessão possui prazo de 30 (TRINTA) anos, a CONCESSIONÁRIA deverá elaborar e implementar um Plano de Gestão do Ciclo de Vida e Reinvestimentos, cujo objetivo é assegurar a continuidade operacional, a eficiência dos sistemas e a plena prestação do serviço público durante todo o prazo contratual.

1. Obrigação de Planejamento: Fica expressamente estabelecido que a Concessionária deverá, desde a fase de implantação, prever, planejar e orçar todos os reinvestimentos, substituições, modernizações e upgrades tecnológicos necessários para que a usina opere em conformidade com os padrões técnicos e de desempenho contratuais até o último dia da concessão.
2. Garantia de Continuidade Operacional: O plano deverá garantir que a vida útil de todos os sistemas e componentes críticos seja estendida ou renovada através de manutenção preditiva, preventiva e corretiva, bem como pela substituição oportuna, assegurando que nenhuma interrupção ou degradação do serviço decorra da exaustão técnica dos ativos.
3. Entrega do Ativo em Condições Operacionais: Ao término da concessão, a Concessionária será obrigada a entregar o empreendimento ao poder concedente em plenas condições de operação, incluindo todos os ativos com vida útil remanescente compatível com a continuidade dos serviços. Os equipamentos entregues não poderão estar em fase final de vida útil ou próximo de exigir substituição imediata por desgaste natural.
4. Composição do Plano: O Plano de Gestão do Ciclo de Vida e Reinvestimentos, a ser apresentado e revisado periodicamente conforme estabelecido no Contrato, deverá conter, no mínimo:
  - a) Cronograma de vida útil prevista e vida útil residual de todos os ativos principais.
  - b) Cronograma financeiro dos reinvestimentos necessários, com fontes de recursos identificadas.



- c) Plano de manutenção evolutivo, com aumento da intensidade e dos custos previstos ao longo dos anos.
- d) Estratégia para gestão da obsolescência tecnológica, garantindo a atualização dos sistemas de controle e automação.
- e) Garantias contratuais e/ou provisionamentos financeiros que assegurem a execução dos reinvestimentos nos prazos adequados.

Desta forma, a responsabilidade pela sustentabilidade técnica e financeira da infraestrutura ao longo de todo o ciclo de 30 anos é integralmente da Concessionária, assegurando ao Município a recepção de um ativo moderno, funcional e pronto para operação contínua.

## **9.2. ESTRATÉGIA DE REINVESTIMENTO E MODERNIZAÇÃO**

Reconhece-se que o prazo típico de uma concessão/PPP (25 a 30 anos) ultrapassa a vida útil da maioria dos equipamentos críticos. Portanto, o modelo de negócio deve incorporar, desde sua concepção, uma provisão para reinvestimento (CAPEX de modernização e/ou substituição).

- Fundo de Reserva para Reposição: O edital de licitação poderá prever a constituição de um fundo de reserva, capitalizado ao longo dos primeiros anos da operação, com recursos específicos destinados exclusivamente à substituição programada de equipamentos e componentes que atingirem o fim de sua vida útil.
- Atualização Tecnológica: A concessionária terá a obrigação contratual de manter a eficiência da usina, o que pode incluir a adoção de novas tecnologias que surjam durante o período da concessão, garantindo que a unidade opere sempre dentro dos melhores padrões disponíveis.
- Plano de Manutenção Preventiva e Preditiva: Será implementado um plano robusto de manutenção, monitoramento constante e peças de reposição, visando maximizar a vida útil dos ativos e planejar com antecedência as paradas para substituição, evitando interrupções não programadas no serviço.

## 10. RESULTADOS E INDICADORES ESPERADOS COM A IMPLANTAÇÃO DA URE MARÍLIA

A implantação da Usina de Recuperação Energética (URE) representará um marco na gestão sustentável de resíduos sólidos urbanos no Município de Marília, transformando um passivo ambiental em ativos energéticos, econômicos e ambientais. Com base no fluxo apresentado e nas capacidades do processo, os seguintes resultados e indicadores são esperados:

### 10.1. INDICADORES DE EFICIÊNCIA NA GESTÃO DE RESÍDUOS

- Redução de 45% do Volume Destinado a Aterro Sanitário: Das 62.400 (SESSENTA E DUAS MIL E QUATROCENTAS) toneladas/ano estimadas de RSD coletadas, aproximadamente 28.080 (VINTE E OITO MIL E OITENTA) toneladas/ano deixarão de ser dispostas em aterro, ampliando significativamente sua vida útil e gerando economia na taxa de disposição final.
- Valorização de ~90 (NOVENTA) toneladas/dia de Matéria Orgânica: A fração orgânica, que corresponde a cerca de 45% do total de RSU, será totalmente direcionada para o processo de biodigestão anaeróbia, deixando de ser um problema ambiental e se tornando a matéria-prima para produção de energia renovável.
- Recuperação energética da fração Seca para a geração de Energia Elétrica com ~ 68 (SESSENTA E OITO) toneladas/dia.

### 10.2. INDICADORES DE PRODUÇÃO ENERGÉTICA E SUBSTITUIÇÃO DE COMBUSTÍVEIS FÓSSEIS

- Geração Anual de Biometano: Estima-se uma produção de aproximadamente 1.890.000 (UM MILHÃO, OITOCENTOS E NOVENTA MIL) Nm<sup>3</sup> (NORMAIS METRO CÚBICO) de biometano por ano, um gás renovável com pureza superior a 94% e equivalente ao gás natural de origem fóssil.
- Substituição de Diesel em Frota Veicular: Considerando o poder calorífico do biometano (~1 litro de diesel ≈ 1,3 Nm<sup>3</sup> de biometano), o volume produzido possui potencial para substituir cerca de 1.857.000 (UM MILHÃO, OITOCENTOS E CINQUENTA E SETE MIL) litros de diesel/ano. Esta quantidade é suficiente para abastecer uma frota de até 50 caminhões de coleta de lixo por um ano inteiro (considerando consumo médio de 100 km/l), promovendo uma logística de coleta significativamente mais limpa e econômica para o município.
- Geração Anual de CO<sub>2</sub>: Estima-se uma produção anual de aproximadamente 2.490.000 (DOIS MILHÕES, QUATROCENTOS E NOVENTA MIL TONELADAS) toneladas de CO<sub>2</sub> com



pureza a 99,9% por ano, atendendo aos padrões de qualidade para aplicações industriais, alimentícias e médias, reduzindo a dependência de CO<sub>2</sub> de origem fóssil.

- Geração Anual de Energia Elétrica: Estima-se uma produção de 19.980 (DEZENOVE MIL NOVECIENTOS E OITENTA) megawatt por ano, é possível abastecer aproximadamente 11.100 residências por ano.
- Substituição de Gás Natural Fóssil: O biometano também pode ser injetado na rede de distribuição, substituindo diretamente o gás natural de origem fóssil consumido por indústrias, comércios e residências, contribuindo para a segurança energética regional e a descarbonização da economia.

### **10.3. INDICADORES DE GANHOS AMBIENTAIS E REDUÇÃO DE EMISSÕES**

- Redução de Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE): A captura e aproveitamento do metano proveniente da decomposição orgânica, que seria liberado no aterro, evitará a emissão de aproximadamente 48.300 (QUARENTA E OITO MIL E TREZENTOS) toneladas de CO<sub>2</sub> equivalente/ano. Este volume é comparável à emissão anual de mais de 10.000 automóveis movidos a gasolina, posicionando Marília na vanguarda dos compromissos ambientais.
- Eliminação de Passivo Ambiental (Chorume): O desvio da matéria orgânica do aterro sanitário reduzirá drasticamente a geração de chorume, minimizando os riscos de contaminação do solo e dos recursos hídricos subterrâneos e superficiais do entorno.
- Produção de Biofertilizante: O digestato resultante do processo de biodigestão, rico em nutrientes, poderá ser processado e poderá ser utilizado como corretivo orgânico de solo em áreas verdes públicas, agricultura ou recuperação de áreas degradadas, fechando o ciclo nutritivo e reduzindo a dependência de fertilizantes químicos.

### **TERMO DE ENCERRAMENTO**

Este Termo encerra CADERNO I – MODELAGEM TÉCNICO-OPERACIONAL, obedecendo às especificações técnicas constantes do Edital. Este caderno possui 84 (oitenta e quatro) páginas numeradas sequencialmente de 1 a 84.