

### III-327 – PROCEDIMENTO DE APOIO A TOMADA DE DECISÃO NA SELEÇÃO DE ROTAS TECNOLÓGICAS DE TRATAMENTO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS NO ÂMBITO DE UM PROJETO DE PESQUISA E DESENVOLVIMENTO

**Letícia dos Santos Macedo<sup>(1)</sup>**

Tecnóloga em Saneamento Ambiental pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Mestre em Ciências pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo (EPUSP). Pesquisadora Assistente no Laboratório de Resíduos e Áreas Contaminadas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

**Cláudia Echevengúá Teixeira<sup>(2)</sup>**

Bióloga pela Universidade de Caxias do Sul. Mestre em Engenharia Civil pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP). Doutora em Engenharia Civil e Ambiental pela Universidade de Sherbooke, Canadá. Pós-doutora pela Universidade do Estado do Arizona. Pesquisadora no Laboratório de Resíduos e Áreas Contaminadas do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

**Camila Peres Massola<sup>(3)</sup>**

Engenheira de Minas formada pela Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, com Mestrado e Doutorado em Engenharia Mineral pela mesma instituição. Pesquisadora no Laboratório de Processos Metalúrgicos do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

**Marcelo Aparecido Mendonça<sup>(4)</sup>**

Doutorando em Engenharia Química pela Universidade Estadual de Campinas, São Paulo; mestre em Engenharia Química pela Universidade de São Paulo (2005); graduação em Engenharia Química pelas Faculdades Oswaldo Cruz (2000), São Paulo. Atualmente é pesquisador e chefe do Laboratório de Combustíveis e Lubrificantes do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

**Débora do Carmo Linhares<sup>(5)</sup>**

Bióloga pelo Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo e Mestre em Ciências (Microbiologia) pela mesma Universidade. Pesquisadora do Laboratório de Biotecnologia Industrial do Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo (IPT).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Av. Professor Almeida Prado, 532 – Cidade Universitária – São Paulo – SP - CEP: 05508-901 - Brasil - Tel: (11) 3767-4251 - e-mail: [leticiasm@ipt.br](mailto:leticiasm@ipt.br).

#### RESUMO

A geração crescente de resíduos sólidos urbanos (RSU), bem como os impactos sociais, econômicos e ambientais negativos, decorrentes do gerenciamento e da disposição inadequados, representa um dos grandes problemas e desafios da sociedade moderna. A solução para o problema não é simples, visto a variedade de aspectos sociais, econômicos, ambientais, políticos, tecnológicos envolvidos. Isso vem aumentando a discussão e o desenvolvimento de procedimentos para subsidiar a tomada de decisão na escolha de alternativas tecnológicas para o gerenciamento de resíduos sólidos (e.g. SOLTANI *et al.* 2015). Os modelos utilizam diferentes métricas que permitem comparar alternativas em uma dada condição, considerando diferentes aspectos, escalas, profundidade e robustez de informação.

No âmbito de um projeto de pesquisa e desenvolvimento a escolha de alternativas tecnológicas para serem testadas e avaliadas em escala piloto em um município paulista foi subsidiada por um procedimento elaborado para dar apoio a tomada de decisão. Esse artigo visa apresentar e discutir o procedimento de apoio à tomada de decisão elaborado e aplicado, que resultaram na concepção da plataforma tecnológica que permitirá avaliar a eficiência e a adequabilidade dos processos de tratamento de resíduos para diferentes cenários no aspecto técnico, econômico e ambiental, os quais possibilitarão dar apoio técnico aos municípios na tomada de decisão.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos Sólidos Urbanos, triagem mecanizada, biodigestão anaeróbia, processos térmicos, análise multicritérios.

## INTRODUÇÃO

A geração crescente de resíduos sólidos urbanos (RSU), bem como os impactos sociais, econômicos e ambientais negativos, decorrentes do gerenciamento e da disposição inadequados, representa um dos grandes problemas e desafios da sociedade moderna. A evolução da forma com que lidamos com este problema vem ocorrendo de maneira lenta e desorganizada. A 20 ou 30 anos atrás era comum ver caminhões de lixo descarregando cargas em vales sem qualquer preocupação com a contaminação, catadores vivendo da segregação deste lixo sem nenhuma preocupação aos riscos à saúde.

Os avanços foram sendo incorporados à medida que os instrumentos legais começaram a ser operacionalizados. Atualmente no Estado de São Paulo já se pode falar na realidade dos aterros sanitários (58,7%) (ABRELPE, 2014). Este método de “tratamento” dos resíduos era considerado adequado até a publicação da Política Nacional de Resíduos Sólidos, onde a definição de disposição final ambientalmente adequada se torna:

“a 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”; e a definição dos rejeitos: “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada” (BRASIL, 2010).

Desta forma para o futuro almejam-se sistemas integrados de forma regional, a fim de possibilitar a destinação final ambientalmente adequada, definida como:

“a destinação de resíduos que inclui a reutilização, a reciclagem, a compostagem, a recuperação e o aproveitamento energético ou outras destinações admitidas pelos órgãos competentes, 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” (BRASIL, 2010).

Baseando-se nas premissas e objetivos estabelecidos na legislação brasileira e nas práticas globais, entende-se que não existe uma solução única e que arranjos e associações de alternativas tecnológicas podem ser possíveis, considerando as características dos resíduos, da infraestrutura já instalada, das partes interessadas, bem como requisitos legais, sociais e econômicos. Desta forma, é possível atuar na pesquisa e desenvolvimento das diversas alternativas tecnológicas no apoio da definição do melhor sistema para a situação de cada município ou região.

O desenvolvimento de um sistema de gestão de resíduos é complexo e para que seja sustentável em longo prazo, é necessário considerar:

- Todos os elementos físicos (infraestrutura e tecnologias) do sistema, a partir da geração de resíduos por meio de armazenamento, coleta, transporte, transferência, reciclagem, recuperação, tratamento e disposição.
- Todas as partes interessadas (atores) envolvidos, incluindo os municípios; governos regionais e nacionais; geradores/usuários de serviços (incluindo indústria, comércio, instituições e famílias); produtores (aqueles que colocam produtos no mercado que se tornam resíduos no final de sua vida, incluindo fabricantes, marca, proprietários, os importadores e outros na cadeia de abastecimento); prestadores de serviços da sociedade civil e organizações não-governamentais (ONGs) (que desempenham um variedade de papéis, incluindo facilitar a participação de outras partes); agências internacionais; etc.
- Todos os aspectos estratégicos, incluindo a política, saúde, institucional, social, econômica, financeira.

Dentro deste cenário, os municípios precisam enfrentar o problema sem um apoio técnico adequado, com a necessidade premente de selecionar e implantar alternativas adequadas e viáveis em diferentes dimensões (técnica, ambiental e econômica). Ou seja, a solução do problema envolve questões de governança (gestão) e tecnologia.

Para Gomes et al. (2001), o conceito de participação, no âmbito dos processos de diagnósticos e planejamentos participativos, pressupõe divisão de poder no processo decisório, passando pelo controle das partes sobre a execução e a avaliação dos resultados pretendidos. Ou seja, participar, neste caso, é tomar parte das decisões e ter parte dos resultados.

A Figura 1 apresenta as etapas e processo geral da tomada de decisão baseada em multicritérios. A tomada de decisão baseada em multicritérios e multistakeholders é orientada por meio do seguinte processo geral: definição do objetivo, definição dos critérios de avaliação, construção dos cenários, seleção dos cenários que serão avaliados, análise dos cenários e discussão dos resultados e escolha do(s) cenário(s).



**Figura 1 – Processo geral da tomada de decisão baseada em multicritérios (GREGORY et al., 2012; BELTON e STEWART (2001); REICHERT, 2013)**

Os municípios são os responsáveis, em primeira instância, por lidar e equacionar o problema dos RSU, organizando os sistemas de gerenciamento e de gestão. O desempenho destes sistemas depende do correto entendimento e equacionamento dos fatores que afetam a gestão de resíduos nas diferentes etapas, desde a organização da fonte geradora, coleta/transporte, tratamento e processamento e sua disposição final.

A definição de tecnologias adequadas em um dado cenário é complexa e deve preceder de uma ampla discussão, respeitando os aspectos sociais, ambientais e econômicos do local onde será implantada. Entende-se que não existe uma solução única e que arranjos e associações de alternativas tecnológicas devem ser avaliados, considerando as características dos resíduos, da infraestrutura já instalada, das partes interessadas, bem como de requisitos legais, sociais e econômicos.

Em função destas informações o questionamento principal é como avançar? O avanço nas decisões relativas a RSU passam por duas esferas, a esfera das inovações no campo tecnológico e na esfera de gestão.

A esfera tecnológica é baseada nos processos de separação e tratamento de resíduos e com isso podem ser listadas diversas

- Dimensionamento, monitoramento e avaliação de desempenho técnico de alternativas tecnológicas;
- Desenvolvimento/adaptação de novas tecnologias;
- Dispositivos de manuseio e acondicionamento dos resíduos na origem;
- Tecnologia de separação e beneficiamento de materiais (geração de CDR para processos térmicos; recuperação de matéria orgânica para processos biológicos; recuperação de materiais recicláveis )
- Implantação de processos de biometanização (geração e aproveitamento de biogás; redução da massa de resíduos orgânicos e de água; procedimentos de avaliação de desempenho)
- Testes de combustão (incineração) de RSU visando recuperação de energia (estimativa do rendimento energético; caracterização e quantificação de produtos e resíduos gerados (cinzas e emissões); tratamento dos gases);
- Avaliação comparativa e de integração de tecnologias.

Já a esfera da gestão, é baseada na construção e operacionalização dos modelos sustentáveis de gestão integrada de resíduos sólidos urbanos que consigam operacionalizar os conceitos de economia circular, pirâmide hierárquica da minimização dos resíduos à disposição final do rejeito em Aterro, o *Ecodesign*, a

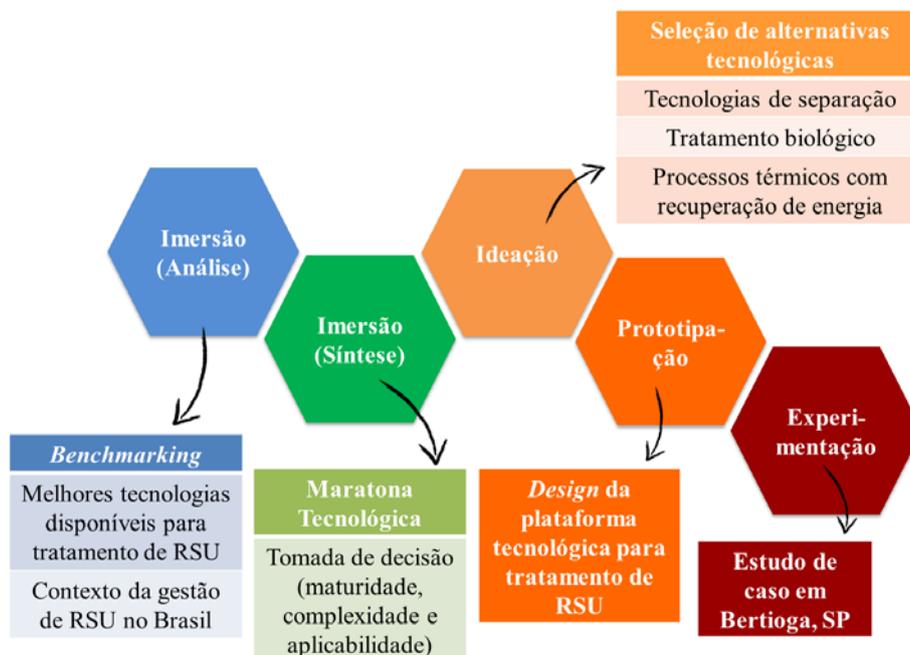
valorização de produtos, educação ambiental, logística reversa, entre outras ferramentas. Para tanto se torna necessário a reavaliação do processo produtivo, a revisão dos valores e redefinição dos produtos e consumo. Para então criar o *design* e desempenho destes produtos, construir parcerias que operacionalizem o processo e a partir disto gerar valor (LUZ & TEIXEIRA, 2015).

Neste contexto o governo do estado de São Paulo por meio do Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) vem desenvolvendo o projeto de P&D “RSU Energia” visando o desenvolvimento de uma plataforma tecnológica para o tratamento de RSU, incluindo programas para melhorar a coleta seletiva e avaliar tecnologias de separação e tratamento de RSU, para dar apoio aos municípios.

O objetivo deste artigo é apresentar o procedimento de apoio à tomada de decisão, utilizado no início deste projeto para definir quais as tecnologias que seria experimentadas em escala piloto. Ressalta-se que a ideia da tomada de decisão para os municípios deve considerar todos os fatores citados, considerando a complexidade da operacionalização do sistema de gestão de resíduos sólidos urbanos, desta forma estão sendo realizados estudos para que este procedimento evolua para um modelo de tomada de decisão em Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) para os municípios. O modelo será baseado em multicritérios (e.g. técnico, econômico, ambiental, social) e múltiplos *stakeholders*, com o desenvolvimento de uma ferramenta de simulação para subsidiar a tomada de decisão por parte de administradores públicos e concessionários privados envolvidos em análises de problemas, critérios, subcritérios e alternativas em programas de gerenciamento integrado de RSU. Criar o modelo baseado em um estudo de caso real, com todos os fatores e atores já envolvidos é o grande desafio.

## MATERIAIS E MÉTODOS

O procedimento utilizado foi desenvolvido tendo como contexto as etapas ilustradas na Figura 2. Para elaboração do procedimento foi utilizada a abordagem do “*design thinking*”, por permitir combinar empatia em um contexto de um problema, de forma a colocar as pessoas no centro do desenvolvimento de um projeto: criatividade para geração de soluções e razão para analisar e adaptar as soluções para o contexto (Vianna *et al.*, 2012).



**Figura 2: Etapas de elaboração do procedimento de apoio à tomada de decisão**

A etapa de imersão envolveu o levantamento e sistematização de informações visando o entendimento do problema em termos de geração, composição de resíduos e condicionantes, bem como a identificação de tecnologias, nas rotas consideradas (triagem mecanizada, processos biológicos e processos térmicos). Para tanto, foi realizada uma prospecção de tecnologias, prospecção de fornecedores (foram recebidas em torno de

30 empresas), *brainstorming* com especialistas e visitas técnicas. Realizou-se um levantamento dos fatores condicionantes (técnicos, ambientais, institucionais/organizacional, político/legal, financeiro/econômico e social) na escolha do sistema de tratamento de resíduos sólidos urbanos. A etapa de imersão foi finalizada com uma Maratona Tecnológica, onde os grupos criaram fluxogramas e diagramas, de forma a detalhar como seria a operação de cada um dos módulos da plataforma, já incluindo um balanço de massa e hipóteses para o procedimento metodológico que acompanharia os processos. Estes fluxogramas foram então apresentados aos demais grupos, como forma de analisar os potenciais e possíveis pontos de melhoria de cada uma das partes envolvidas no processo e integração das alternativas tecnológicas propostas. Esta última etapa gerou o *design* da plataforma tecnológica para avaliação das tecnologias de tratamento de RSU. Por fim, a etapa de experimentação está em andamento no Município de Bertioga, SP, Brasil.

A definição dos critérios para a elaboração do procedimento de apoio a tomada de decisão consideraram autores como Guerrero *et al.* (2013), UNEP & ISWA (2015) e FADE (2015). É importante salientar que um projeto de P&D pode otimizar o atual sistema de gestão de resíduos sólidos do município piloto (Bertioga, SP), inicialmente identificando as limitações e oportunidades, e apoiando o planejamento e seleção de tecnologias para tratamento do RSU baseados em critérios claros e objetivos (TEIXEIRA *et al.*, 2016).

As três rotas tecnológicas foram definidas em função das seguintes premissas:

- Necessidade, por parte dos municípios, de atender às diretrizes legais sobre resíduos sólidos, destacando-se a erradicação de lixões, incentivo à reciclagem, agregar valor aos resíduos, geração de fontes alternativas de matérias-primas e energia;
- Redução de custos operacionais com a gestão de resíduos;
- Necessidade de desenvolvimento tecnológico aplicado à realidade brasileira, visando à recuperação de materiais e o aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos;
- Falta de critérios para avaliação de soluções ofertadas pelo mercado para resíduos sólidos urbanos; e
- Ausência de capacitação e infraestrutura nos municípios em avaliar as soluções ofertadas pelo mercado, principalmente aquelas que indicam alternativas tecnológicas inovadoras.

Sabe-se que a definição de tecnologias adequadas em um dado cenário é complexa e deve preceder de uma ampla discussão, respeitando os aspectos sociais, ambientais e econômicos do local onde será implantada. Entende-se que não existe uma solução única e que arranjos e associações de alternativas tecnológicas de forma integrada devem ser avaliados, considerando as características dos resíduos, da infraestrutura já instalada, das partes interessadas, bem como de requisitos legais, sociais e econômicos.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o procedimento de apoio a tomada de decisão estabeleceu-se três grupos de critérios, a saber: nível de maturidade tecnológica, grau de complexidade e grau de aplicabilidade. A Tabela 1 apresenta as características gerais do procedimento de apoio à decisão elaborado.

**Tabela 1: Características gerais do procedimento de apoio à decisão elaborado**

<b>Critério</b>	<b>Descrição</b>	<b>Escala</b>	<b>Resultado</b>	<b>Referências</b>
<b>Nível de maturidade tecnológica (Tabela 2)</b>	Permite avaliar uma tecnologia em uma escala numérica de 1 a 9, separadas pelo nível de desenvolvimento em que ela se encontra (pesquisa e desenvolvimento, inovação e comercialização), com subdivisões em cada uma dessas atividades.	De 1 a 9 crescente	Número total de pontos até	Adaptado de United States Department of Defense (2011)
<b>Grau de Complexidade (Tabela 3)</b>	Características da tecnologia em relação a sua instalação, operação, manutenção e nível de segurança requerido.	De 3 em 3 decrescente até 9	um máximo de 27	Elaborado pelos autores
<b>Grau de Aplicabilidade (Tabela 4 e 5)</b>	É constituído de um conjunto de 15 perguntas, distribuídas em 8 grupos de fatores.	Somatório de pontos até nove		Elaborado pelos autores a partir de UNEP & ISWA (2015)

A escala para se avaliar o nível de maturidade tecnológica já é consagrada (Tabela 2). Ela permite avaliar uma tecnologia em uma escala numérica de 1 a 9, separadas pelo nível de desenvolvimento em que ela se encontra (pesquisa e desenvolvimento, inovação e comercialização), com subdivisões em cada uma dessas atividades.

**Tabela 2: Escala de nível de maturidade da tecnologia (TRL) (Adaptado de *United States Department of Defense, 2011*)**

<b>Nível de Maturidade da Tecnologia (TRL)</b>	<b>Atividade</b>	<b>Descrição</b>
1	Pesquisa e desenvolvimento	Princípios básicos observados e reportados
2		Formulação de conceito tecnológico e/ou de aplicação
3	Inovação	Comprovação experimental do conceito
4		Validação do conceito ou processo em laboratório
5		Validação do componente ou sistema em ambiente relevante
6		Demonstração de modelo do sistema em ambiente relevante
7		Demonstração de protótipo do sistema em ambiente operacional
8	Comercialização	Sistema real completo e qualificado em ambiente operacional por meio de testes e demonstrações
9		Sistema real qualificado por meio de missões de operação bem sucedidas

O grau de complexidade foi elaborado, visando criar um critério associado aos fatores relacionados à instalação, operação, manutenção e segurança das tecnologias, conforme Tabela 3. Criou-se também uma escala de 1 a 9, separadas em três grupos. Nesta métrica foi considerado que quanto mais fácil uma tecnologia em termos de instalação, operação, manutenção e nível de segurança, maior a pontuação atribuída, ou seja, quanto mais simples melhor. Esta prerrogativa foi adotada, considerando condicionantes locais, como disponibilidade de mão de obra especializada e serviços de manutenção, entre outros.

**Tabela 3 – Definição da escala de grau de complexidade tecnológica**

<b>Grau de Complexidade Tecnológica</b>	<b>Classificação</b>	<b>Descrição</b>
<b>9 – 7</b>	Baixo	Fácil de Instalar, operação e manutenção simples, baixo nível de segurança requerido
<b>6 – 4</b>	Médio	Requer um tempo maior de instalação, a operação necessita de controles específicos, a manutenção necessita de técnicos especializados, segurança moderada requerida
<b>3 – 1</b>	Alto	Instalação, operação e manutenção complexas e alto nível de segurança requerido

A avaliação em termos de grau de aplicabilidade (Tabela 4) possui uma métrica constituída de um conjunto de 16 perguntas, distribuídas em grandes grupos de fatores, a saber: características dos resíduos; extensão do uso; acessibilidade de aquisição da tecnologia (fornecedores e fabricantes nacionais); nível de qualificação da mão de obra, flexibilidade; custo e mercado para os produtos gerados; escala; e condicionantes ambientais da tecnologia. As perguntas foram adaptadas a partir do material da UNEP & ISWA (2015). Por estes fatores, a tecnologia vai ser considerada mais aplicável se obtiver pontuação maior, conforme apresentado na Tabela 4 (resposta atribuída que daria a pontuação à pergunta), perfazendo pontuação máxima de 9 (nove). Uma escala de grau de aplicabilidade em alta, média e baixa foi definida para os intervalos de pontuação, conforme Tabela 5.

O grau de aplicabilidade é intrínseco à realidade que está sendo avaliada, por exemplo, pode mudar de município para município, enquanto os demais critérios poderão ser mantidos, neste estudo o procedimento foi aplicado ao cenário do município de Bertiooga, SP, que representa municípios brasileiros de pequeno e médio porte.

**Tabela 4 – Definição dos questionamentos para definição da aplicabilidade**

Fatores	Perguntas	Resposta "Sim ou Não"	Pontuação atribuída à resposta
<b>Características dos Resíduos</b>	Algun componente do resíduo limita significativamente o processo (p. ex. torna o sistema inoperante)?	Não	0,5625
<b>Extensão do uso</b>	A tecnologia considerada está funcionando em outro lugar, em condições semelhantes em termos de composição dos resíduos, clima, hábito da população?	Sim	0,5625
	Há plantas e/ou equipamentos instaladas no Brasil para o tratamento de resíduos sólidos urbanos em escala de demonstração?	Sim	0,5625
	Há plantas e/ou equipamentos instaladas no Brasil para o tratamento de resíduos sólidos urbanos em escala comercial?	Sim	0,5625
	É possível visitar a planta ou instalação para avaliação in loco?	Sim	0,5625
	Você já teve acesso a documentos ou visitou alguma planta e/ou equipamento para comprovação do desempenho para tratamento de RSU?		0,5625
<b>Acessibilidade de aquisição da tecnologia</b>	Há fornecedor dos equipamentos no Brasil (fornecedor nacional ou representante internacional)?	Sim	0,5625
	A fabricação dos equipamentos é nacional?	Sim	0,5625
<b>Nível de qualificação da mão de obra necessária</b>	A tecnologia pode ser operada e passível de manutenção, utilizando mão de obra e peças de reposição locais (município e estado)?	Sim	0,5625
<b>Flexibilidade</b>	É possível montar, desmontar, adaptar com facilidade a tecnologia a fim de atender possíveis flutuações na quantidade de resíduos gerados?	Sim	0,5625
	É possível montar, desmontar, adaptar com facilidade a tecnologia a fim de atender possíveis flutuações no tipo de resíduos gerados?	Sim	0,5625
<b>Custo e Mercado para os produtos gerados</b>	Os custos de instalação são realistas e acessíveis para usuários de serviços locais?	Sim	0,5625
	A relação custo/benefício é interessante considerando municípios menores?	Sim	0,5625
	Há mercado local para os produtos gerados (ex.: calor, biogás, composto, materiais recicláveis)?	Sim	0,5625
<b>Escala</b>	A tecnologia é ofertada em diferentes escalas, sendo ajustável a quantidades menores de resíduos?	Sim	0,5625
<b>Condicionantes ambientais da tecnologia</b>	A tecnologia tem restrições ambientais significativas (alto consumo de energia, geração de resíduos e emissões)?	Não	0,5625
<b>Classificação Geral da aplicabilidade= 9 (nove)</b>			

**Tabela 5 – Grau de aplicabilidade no projeto**

Grau de aplicabilidade no projeto	Classificação	Descrição
9 – 7	Alto	Considera que atende entre 100 % e 77 % aos critérios de aplicabilidade
6 – 4	Médio	Considera que atende entre 66,6 % a 44,4 % aos critérios de aplicabilidade
3 – 1	Baixo	Considera que atende entre 33,3 % a 11,1 % aos critérios de aplicabilidade

Convém ressaltar que este método foi aplicado separadamente por rota tecnológica, rotas de separação mecanizada; biodigestão anaeróbia, térmicas (incineração, pirólise e gaseificação (visando comparar e analisar alternativas tecnológicas da mesma rota, a fim de definir a melhor alternativa para posterior avaliação da integração destas rotas). Desta forma, não foi realizada uma avaliação cruzada (por exemplo, processo biológico *versus* incineração, ou pirólise *versus* gaseificação), a premissa do projeto de PD&I é a de integração de rotas tecnológicas.

Visando validar a métrica elaborada com os três critérios, foi solicitado que três pesquisadores com experiência da rota tecnológica de separação mecanizada avaliassem duas tecnologias desta rota, a saber: peneiramento e separação balística. Cada um preencheu as planilhas eletrônicas disponibilizadas individualmente. Na Tabela 6 está apresentado o resultado da avaliação de cada pesquisador, bem como o desvio padrão. O padrão de resposta para cada tecnologia de separação foi similar, baixo desvio padrão (entre 0,5 e 1,4), tendo a separação balística apresentado um desvio maior. Atribuiu-se essa diferença como sendo uma função do nível de conhecimento do respondente em relação à tecnologia analisada. Sugeriu-se que as avaliações fossem feitas em grupo, por meio da técnica “painel de especialistas”, sendo a pontuação atribuída o consenso dos especialistas avaliadores.

**Tabela 6 – Validação da tomada de decisão**

<b>Tecnologias</b>	<b>Nível de Maturidade</b>	<b>Grau de Complexidade Tecnológica</b>	<b>Grau de Aplicabilidade</b>	<b>Soma geral</b>
<b>Peneiramento (Especialista 1)</b>	9	9	9	27
<b>Peneiramento (Especialista 2)</b>	8	9	9	26
<b>Peneiramento (Especialista 3)</b>	9	9	8,4	26,4
<b>Média</b>	<b>8,67</b>	<b>9,00</b>	<b>8,80</b>	<b>26,47</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>0,58</b>	<b>0,00</b>	<b>0,35</b>	<b>0,50</b>
<b>Separação balística (Especialista 1)</b>	9	6	5,4	20,4
<b>Separação balística (Especialista 2)</b>	6	9	3	18
<b>Separação balística (Especialista 3)</b>	9	6	3	18
<b>Média</b>	<b>8,00</b>	<b>7,00</b>	<b>3,80</b>	<b>18,80</b>
<b>Desvio Padrão</b>	<b>1,73</b>	<b>1,73</b>	<b>1,39</b>	<b>1,39</b>

Considerando os resultados da avaliação do peneiramento, por exemplo, pode-se dizer que é uma tecnologia comercial, de fácil instalação, operação e de alta aplicabilidade ao projeto. A separação balística também é uma tecnologia comercial, de fácil instalação e de aplicabilidade média. Pelos resultados, se fosse necessário fazer uma escolha poder-se-ia dizer que o peneiramento apresenta desempenho melhor nos três grupos de critérios analisados.

Utilizando esta escala, as seguintes tecnologias nas rotas de separação física, rotas de biodigestão anaeróbia e rotas térmicas foram avaliadas como seguem:

- Separação física (Tabela 7): peneiramento; separação balística; separação ótica; separação magnética por eletroímã; separação magnética por Eddycurrent; abertura de sacos; Shredder e transporte por correia;
- Biodigestão anaeróbia (Tabela 8):
  - Via seca: tecnologia Dranco; Valorga; Laran; Kompogas;
  - Via extrasseca: Bioferm; Kompoferm; Bekon; e Methar TMO; e
- Processos térmicos (Tabela 9): pirólise; gaseificação; incineração; plantas em escala piloto de diferentes fornecedores.

Conforme mostrado na Tabela 7, verifica-se que todas as tecnologias consideradas para separação de RSU apresentam o grau máximo de maturidade tecnológica, estando disponíveis comercialmente e em operação. Esse aspecto se reflete na escala dos equipamentos ofertados pelos fabricantes, que são configurados para atender grandes quantidades de resíduo (mínimo em torno de 2 t/h).

O grau de complexidade tecnológica varia de acordo com a finalidade da tecnologia, já apresentada no Quadro 11, mas pode-se dizer que ele é função do grau de separação que se deseja: equipamentos mais simples são utilizados nas separações mais grosseiras, enquanto que os mais complexos tecnologicamente, como o separador ótico, são capazes de fazer uma separação mais criteriosa dos materiais.

**Tabela 7 – Tomada de decisão das tecnologias de Triagem Mecanizada de RSU**

<b>Tecnologias</b>	<b>Nível de Maturidade</b>	<b>Grau de Complexidade Tecnológica</b>	<b>Grau de Aplicabilidade</b>	<b>Soma geral</b>
<b>Peneiramento</b>	9	9	8,4	26,4
<b>Separação balística</b>	9	6	5,6	20,6
<b>Separação ótica</b>	9	3	5,6	17,6
<b>Separação magnética - eletroímã</b>	9	9	9,0	27,0
<b>Separação magnética - Eddycurrent</b>	9	7	7,9	23,9
<b>Abertura de sacos</b>	9	7	8,4	24,4
<b>Shredder</b>	9	5	4,5	18,5
<b>Transporte por correia</b>	9	9	9,0	26,4

As tecnologias que alcançaram as maiores notas na soma geral são também aquelas que apresentaram as maiores notas no quesito “aplicabilidade no projeto” e, portanto, esse foi o critério considerado para estabelecer uma primeira aproximação das tecnologias que poderiam ser aplicadas na planta de avaliação, a saber: abertura de sacos, transporte por correia, peneiramento, separação magnética (de ferrosos e não-ferrosos) e separação balística.

Entende-se que o conjunto de equipamentos definido representa uma configuração intermediária entre a triagem manual e o estado da arte da triagem totalmente automatizada, dentro da gama de equipamentos disponíveis comercialmente para este fim.

Uma vez que as tecnologias consideradas são complementares, cada uma propicia um tipo de separação para determinado material. Portanto, ainda que as tecnologias levantadas apresentem elevado grau de maturidade tecnológica, é possível rearranjar os fluxogramas de processo de acordo com o tipo e quantidade de material de valor comercial disponíveis para separação presentes no RSU de cada região. Desta forma, esta configuração já representa uma melhora substancial para se somar à triagem manual, tanto em termos de capacidade de material processado, quanto em qualidade dos produtos obtidos.

Verificou-se um potencial de aplicação das tecnologias de separação em escala de demonstração, visto que todas já estão disponíveis comercialmente. O fator limitante para o tamanho mínimo da planta, neste caso, é a escala dos equipamentos, como já foi comentado anteriormente. No entanto, dentre as empresas contatadas, existem prestadores de serviços especializados que se propõem a oferecer equipamentos, em escala reduzida, em função da configuração de processo proposta pelo IPT.

Após avaliação e pontuação dos sistemas de tratamento da FORSU (Fração Orgânica do Resíduo) (Tabela 8), dentro das opções de via seca, a melhor classificação foi apresentada pelo sistema Kompogas pois, além da robustez, é o único com representante no Brasil. No entanto, por se tratar de uma tecnologia internacional, o custo de montagem e manutenção deste sistema pode representar dificuldades adicionais para contratação pela maioria dos municípios brasileiros. Deve-se ainda ressaltar que, por tratar-se de um processo de biodigestão contínua, este possui sistemas complexos de alimentação da FORSU e extração do material digerido, sendo muito sujeito a falhas e alto valor de manutenção.

**Tabela 8–Tomada de decisão das tecnologias de Biodigestão anaeróbia**

Tecnologias	Nível de Maturidade	Grau de Complexidade Tecnológica	Grau de Aplicabilidade	Soma geral
Via seca - DRANCO	9	4	1,7	14,7
Via seca - Valorga	9	4	1,7	14,7
Via seca - Laran	9	5	1,7	15,7
Via seca - Kompogas	9	5	3,9	17,9
Via extrasseca -Bioferm	8	6	3,9	17,9
Via extrasseca -Kompoferm	8	6	3,9	17,9
Via extrasseca -Bekon	8	6	3,9	17,9
Via extrasseca–Methar TMO	5	6	5,1	16,1

Dentre as tecnologias prospectadas, de tratamento térmico de RSU com recuperação de energia, foram abordadas as tecnologias de incineração, gaseificação e pirólise. Considerando o entendimento obtido nos levantamentos, as tecnologias foram classificadas segundo os critérios elaborados de forma conjunta para subsidiar as escolhas para a Plataforma Tecnológica, conforme na Tabela 9.

**Tabela 9 - Quadro de avaliação das rotas térmicas, unidades piloto e unidades em escala de bancada**

Tecnologias	Nível de Maturidade	Grau de Complexidade Tecnológica	Grau de Aplicabilidade	Soma geral
Pirólise	7	2	3,9	12,9
Gaseificação	8	2	3,9	13,9
Incineração	9	3	3,9	15,9
INNOVA: pirólise	6	2	4,5	12,5
W2E: gaseificador	5	2	3,9	10,9
Bioware: pirólise	5	2	4,5	11,5
Carbogás: gaseificador	6	2	4,5	12,5

Na Tabela 9 é apresentada a avaliação geral das rotas térmicas. A incineração de RSU é a que mais vem sendo utilizada em escala comercial no mundo, com centenas de unidades de grande porte, em geral com capacidade média ao redor de 700 t/dia. Também existem unidades de gaseificação e pirólise de RSU operando em escala comercial, mas em número muito menor que a incineração e, em geral, com capacidades também menores, em torno de 160 t/dia. Essas duas últimas tecnologias ainda se encontram em um estágio de desenvolvimento menor do que a incineração, mas apresentam grande potencial de utilização para escalas menores, adequadas para a maioria dos municípios brasileiros. Por essa razão, elas aparecem com pontuações menores do que a incineração, principalmente devido ao menor grau de maturidade tecnológica. Quanto ao grau de complexidade tecnológica, todas foram consideradas de alto grau de complexidade, mas a incineração, em geral, necessita de uma quantidade menor de processamento do RSU (pré-tratamento da matéria-prima como secagem e trituração etc.), razão pela qual apresentou um grau de complexidade menor.

O principal resultado da aplicação deste procedimento foi a concepção da Plataforma Tecnológica a ser aplicada no município piloto. Entende-se como plataforma tecnológica o conjunto de equipamentos, em escala de bancada e/ou piloto de campo, que permitirá obter parâmetros confiáveis de controle e de eficiência das tecnologias em avaliação, associado ao desenvolvimento de métodos, procedimentos e protocolos de ensaios. A Plataforma Tecnológica é constituída de quatro módulos, os quais podem interagir entre si e permitir avaliar e otimizar diferentes etapas do sistema de gestão de resíduos.

O módulo I, denominado organização da fonte geradora, visa avaliar e propor soluções para o aumento à adesão aos programas de segregação na origem (coleta seletiva), bem como analisar o efeito da triagem sobre o potencial de reciclabilidade do material e na eficiência de outras tecnologias (contaminação e poder energético de RSU), será implementado numa unidade amostral, já selecionada, no município de Bertiooga. O Módulo II, referente à triagem mecanizada, será implantado em escala de demonstração e constituído dos equipamentos de

abertura de sacos, peneiramento e separador magnético, para obtenção de materiais recicláveis e matérias-primas para os tratamentos térmicos e biodigestão. O módulo III consiste da instalação de uma planta piloto de biodigestão anaeróbia, de tecnologia extrasseca, túneis de metanização. Pretende-se avaliar e desenvolver inovações nessa tecnologia, sendo que a planta do projeto básico será concebida pela equipe do IPT. E por fim o Módulo IV refere-se aos processos térmicos (incineração, gaseificação e pirólise), que será desenvolvido em escala de bancada e serão realizados testes em plantas piloto de fornecedores identificados durante a prospecção tecnológica. A unidade de bancada, que faz parte da expertise a ser montada com a estrutura teórico-experimental, visa a obtenção de parâmetros experimentais. A partir da definição de planos de amostragem dos resíduos de Bertioga, pretende-se obter dados referentes ao rendimento energético, caracterização e qualidade dos produtos e resíduos, desempenho ambiental por meio da medição de gases e particulados. Ressalta-se a plataforma não será operada em fluxo contínuo, com todo o resíduos do município, e sim para atender à população (unidade amostral) a fim de determinar os parâmetros de desempenho dos processos.

## CONCLUSÕES

O procedimento inicial de apoio à tomada de decisão método foi utilizado para as tecnologias presentes nas diferentes rotas tecnológicas demonstrando a tecnologia mais madura, menos complexa e mais aplicável ao projeto de PDI, as tecnologias com melhores pontuações estão sendo aplicadas em escala piloto num município, para obtenção de parâmetros de processo.

A implantação e operação da plataforma tecnológica permitirá avaliar a eficiência e a adequabilidade dos processos de tratamento de resíduos para diferentes cenários no aspecto técnico, econômico e ambiental, o que possibilitará dados iniciais para elaboração de um modelo robusto de tomada de decisão para os municípios.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABRELPE (Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais). *Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2014*. 2014. Disponível em: <[www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf](http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf)>. Access: nov./2015.
2. BELTON, V., STEWART, T., 2001. *Multiple Criteria Decision Analysis: An Integrated Approach*. Kluwer Academic Publishers.
3. BRASIL. *Lei no 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei no 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências*. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 02 ago. 2010
4. FADE (Fundação de Apoio ao Desenvolvimento da Universidade Federal de Pernambuco). *Análise das Diversas Tecnologias de Tratamento e Disposição Final de Resíduos Sólidos Urbanos no Brasil, Europa, Estados Unidos e Japão*. 2015. Disponível em: <[http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes\\_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/aep\\_fep/chamada\\_publica\\_residuos\\_solidos\\_Relat\\_Final.pdf](http://www.bndes.gov.br/SiteBNDES/export/sites/default/bndes_pt/Galerias/Arquivos/produtos/download/aep_fep/chamada_publica_residuos_solidos_Relat_Final.pdf)>. Acesso em: dez./2016.
5. GOMES, L.F.A.M. et al.. *Tomada de decisões em cenários complexos*. São Paulo: Cengage Learning, 2004.
6. GREGORY, R. [et al]. *Structured Decision Making. A Practical Guide to Environmental Management Choices*, 2012.
7. LUZ, B.; TEIXEIRA, C.E.. Ref: *Livro Gestão Empresarial para a Sustentabilidade em tempos de Mudanças Climática*, Editora Manole, 2014-2015. Capítulo Gestão de Ciclo de Vida como diferencial competitivo para as empresas.
8. REICHERT, G.A.. *Apoio à tomada de decisão por meio da avaliação do ciclo de vida em sistemas de gerenciamento integrado de resíduos sólidos urbanos: o caso de Porto Alegre*. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, RS, Brasil, 2013.
9. SOLTANI, A.; HEWAGE, K.; REZA, B.; SADIQ, R. *Multiple stakeholders in multi-criteria decision-making in the context of Municipal Solid Waste Management: A review*. Waste Management (New York, N.Y.) 35 (1), 318-328. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2014.09.010>, 2015
10. TEIXEIRA, C. E.; MACEDO, L. S.; ARDUIN, R. H.; MANÉO, F. P.; GUIMARÃES, C. C.; LEITE, D. C. L.. *How can R&D projects help municipal solid waste management? A case study in Bertioga, São Paulo, Brazil*. In. Sixth International Symposium on Energy from Biomass and Waste, Venice, Italy, 2016.

11. UNEP & ISWA (2015). *Global Waste Management Outlook*. United Nations Environment Programme (UNEP) & International Solid Waste Association (ISWA), 2016.
12. U.S. Department of Defense. *Technology Readiness Assessment (TRA) Guidance*. April, 2011.
13. VIANNA, M.; VIANNA, Y.; ADLER, I. K.; LUCENA, B.; RUSSO, B. *Design Thinking: Inovação em Negócios*. Rio de Janeiro, MJV Press, 2012. 162p.