



Geração de Bioenergia a partir de RSU: Um Estudo de Prospecção Tecnológica

Gabriela Florêncio de Araujo

Trabalho de Conclusão de Curso

Orientadoras:

Prof^a. Ana Mehl

Prof^a. Júlia Pancini de Oliveira

Março de 2021

GERAÇÃO DE BIOENERGIA A PARTIR DE RSU: UM ESTUDO DE PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA

Gabriela Florêncio de Araujo

Projeto de Final de Curso submetida ao Corpo Docente da Escola de Química, como parte dos requisitos necessários a obtenção de grau em Engenharia Química.

Aprovado por:

Tatiana Félix Ferreira, D.Sc.

Flávio da Silva Francisco, D.Sc.

Orientado por:

Ana Mehl, D.Sc.

Júlia Pancini de Oliveira, M.Sc.

Rio de Janeiro, RJ – Brasil

Março de 2021

Araujo, Gabriela Florêncio de.

Geração de bioenergia a partir de RSU: um estudo de prospecção tecnológica / Gabriela Florêncio de Araujo. Rio de Janeiro: UFRJ/EQ, 2021

x, 100 p.; il.

(Monografia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Escola de Química, 2021.

Orientadoras: Ana Mehl e Júlia Pancini de Oliveira.

1.Roadmap tecnológico. 2.Resíduos sólidos urbanos 3.Bioenergia. 4.Monografia (Graduação UFRJ/EQ). 5.Ana Mehl, Júlia Pancini de Oliveira. I. Elaboração de roadmap tecnológico para a geração de energia a partir de RSU.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer aos meus pais, Lucimar e Carlos, que sempre batalharam para que eu tivesse uma boa educação, me apoiaram e acolheram nos momentos difíceis e celebraram cada vitória ao meu lado. Concluir essa etapa da minha vida não seria possível sem o suporte de vocês!

À minha família, em especial à minha avó Júlia e aos meus avós Marlene e Luiz, por todo apoio e amor que recebo.

Às minhas orientadoras, Ana Mehl e Júlia Pancini, por todo tempo, apoio, paciência e dedicação em me orientar nesse processo. O suporte e a segurança que vocês passam contribuiu muito para que tudo fosse mais leve.

Ao meu namorado, André, que mesmo sem entender nada de engenharia química me ouviu falar por horas e horas sobre meus trabalhos sempre disposto a me ajudar.

Aos amigos que a Escola de Química me proporcionou e que me acompanharam ao longo de todos esses anos, Gabriel, Lucas, Marcelle, Matheus e Nathália. Obrigada por todos os momentos alegres, todos os choros, todas as madrugadas estudando! Eu sempre falo que a graduação em engenharia química não é fácil, mas com certeza, ter vocês ao meu lado tornou tudo muito mais divertido.

Resumo da Monografia apresentada à Escola de Química como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de Engenharia Química.

GERAÇÃO DE BIOENERGIA A PARTIR DE RSU: UM ESTUDO DE PROSPECÇÃO TECNOLÓGICA

Gabriela Florêncio de Araujo

Março, 2021

Orientadoras: Prof. Ana Mehl, D.SC.

Prof. Júlia Pancini de Oliveira, M.Sc.

A gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU) tornou-se um problema dos dias atuais, já que grande parte das atividades humanas geram resíduos que normalmente são descartados. Antes da disposição final do RSU em aterros, ainda é possível realizar o tratamento destes, como a recuperação energética. Com isso, o presente trabalho tem como objetivo a prospecção tecnológica da geração de energia a partir do RSU, na qual tem-se um meio sistemático de mapear desenvolvimentos tecnológicos, assim como auxiliar o planejamento a curto, médio e longo prazo neste setor. A metodologia consiste na análise de artigos científicos, patentes concedidas, patentes depositadas e arquivos da mídia especializada. A análise de tais documentos inclui parâmetros como ano da publicação, país de origem, tipo do autor e o foco dos documentos. Com esta análise o *roadmap* tecnológico foi elaborado de acordo com taxonomias obtidas na etapa de prospecção. Os dados obtidos no estudo revelam que, no estágio atual a combustão de resíduos para aproveitamento energético é a tecnologia de conversão mais utilizada, porém a longo prazo os estudos são direcionados para os insumos do processo, bem como para o pré-tratamento dos resíduos. O Brasil mostra-se muito atrasado em relação a países da Europa e aos Estados Unidos, tanto no cenário atual, quanto à longo prazo. Entretanto, a análise do *roadmap* permite pensar em parcerias estratégicas para o país com empresas e universidades que já possuem tecnologias avançadas para o aproveitamento energético do RSU.

ÍNDICE

| | | |
|-------|--|----|
| 1. | Introdução..... | 1 |
| 1.1 | Motivação..... | 1 |
| 1.2 | Objetivos..... | 3 |
| 2. | Prospecção Tecnológica..... | 5 |
| 2.1 | Análise de Patentes e Artigos Científicos..... | 6 |
| 2.2 | <i>Technology Roadmaps</i> | 7 |
| 2.3 | Metodologia..... | 8 |
| 3. | Etapa Pré-prospectiva..... | 12 |
| 3.1 | Resíduos Sólidos Urbanos..... | 12 |
| 3.2 | Tecnologias..... | 16 |
| 3.2.1 | Digestão Anaeróbia..... | 16 |
| 3.2.2 | Gaseificação..... | 19 |
| 3.2.3 | Pirólise..... | 20 |
| 3.2.4 | Combustão..... | 23 |
| 3.2.5 | Fluxograma..... | 26 |
| 4. | Etapa prospectiva..... | 27 |
| 4.1 | Longo Prazo - Artigos Científicos..... | 27 |
| 4.1.1 | Metodologia..... | 27 |
| 4.1.2 | Análise Macro..... | 27 |
| 4.1.3 | Análise Meso..... | 31 |
| 4.1.4 | Análise Micro..... | 33 |
| 4.2 | Patentes Depositadas – Médio Prazo..... | 36 |
| 4.2.1 | Metodologia..... | 36 |
| 4.2.2 | Análise Macro..... | 37 |
| 4.2.3 | Análise Meso..... | 39 |
| 4.2.4 | Análise Micro..... | 40 |
| 4.3 | Curto Prazo – Patentes Concedidas..... | 41 |
| 4.3.1 | Metodologia..... | 41 |
| 4.3.2 | Análise Macro..... | 42 |
| 4.3.3 | Análise Meso..... | 44 |
| 4.3.4 | Análise Micro..... | 45 |

| | | |
|-------|--|----|
| 4.4 | Estágio Atual | 48 |
| 4.4.1 | Metodologia | 48 |
| 4.4.2 | Análise Macro | 48 |
| 4.4.3 | Análise Meso | 49 |
| 4.4.4 | Análise Micro | 50 |
| 5. | Etapa Pós-prospectiva – Elaboração do Roadmap..... | 53 |
| 5.1 | Estágio Atual | 55 |
| 5.2 | Curto Prazo | 58 |
| 5.3 | Médio Prazo | 61 |
| 5.4 | Longo Prazo..... | 62 |
| 6. | Conclusão..... | 70 |
| 6.1 | Sugestão para trabalhos futuros | 71 |
| 7. | Referências..... | 72 |
| I. | Anexo A – Artigos publicados..... | 75 |
| II. | Anexo B – Patentes depositadas..... | 89 |
| III. | Anexo C – Patentes concedidas..... | 91 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 2.1 Metodologia para elaboração de um roadmap..... | 9 |
| Figura 2.2 Modelo genérico de um roadmap..... | 11 |
| Figura 3.1 Composição do RSU no estado do Rio de Janeiro..... | 12 |
| Figura 3.2 Disposição final de RSU pelo tipo de destinação..... | 14 |
| Figura 3.3 Representação esquemática de uma planta de geração de energia a partir de RSU via combustão..... | 25 |
| Figura 3.4 Fluxograma das tecnologias de tratamento do RSU para geração de energia..... | 26 |
| Figura 4.1 Artigos publicados por país..... | 29 |
| Figura 4.2 Artigos publicados por ano..... | 30 |
| Figura 4.3 Artigos publicados por tipo de instituição..... | 31 |
| Figura 4.4 Análise meso: percentual de artigos em cada taxonomia..... | 32 |
| Figura 4.5 Patentes depositadas por país..... | 37 |
| Figura 4.6 Patentes depositadas por tipo de instituição..... | 38 |
| Figura 4.7 Patentes depositadas por ano..... | 39 |
| Figura 4.8 Análise meso: Percentual de patentes depositadas em cada taxonomia..... | 40 |
| Figura 4.9 Patentes concedidas por país..... | 42 |
| Figura 4.10 Patentes concedidas por tipo de instituição..... | 43 |
| Figura 4.11 Patentes concedidas por ano..... | 44 |
| Figura 4.12 Análise meso: Percentual de patentes concedidas de cada taxonomia..... | 45 |
| Figura 4.13 Análise micro dos tipos de separação do RSU..... | 47 |
| Figura 4.14 Distribuição de players por país..... | 49 |
| Figura 4.15 Análise meso – Estágio atual | 50 |
| Figura 5.1 Technology Roadmap Completo..... | 54 |
| Figura 5.2 Recorte referente ao Estágio Atual do Roadmap..... | 58 |
| Figura 5.3 Recorte referente ao Curto prazo do Roadmap..... | 60 |
| Figura 5.4 Recorte referente ao Médio Prazo do Roadmap..... | 62 |
| Figura 5.5 Recorte 1 referente ao Longo Prazo do Roadmap..... | 66 |

| | |
|---|----|
| Figura 5.6 Recorte 2 referente ao Longo Prazo do Roadmap..... | 67 |
| Figura 5.7 Recorte 3 referente ao Longo Prazo do Roadmap..... | 68 |
| Figura 5.8 Recorte 4 referente ao Longo Prazo do Roadmap..... | 69 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 3.1 Composição do biogás..... | 18 |
| Tabela 3.2 Teor energético dos produtos de pirólise comparado a biomassa..... | 21 |
| Tabela 3.3 Comparação dos parâmetros operacionais para processos de pirólise convencional, rápida e flash..... | 22 |
| Tabela 4.1 Número de artigos pela análise micro..... | 34 |
| Tabela 4.2 Número de patentes depositadas pela análise micro..... | 41 |
| Tabela 4.3 Número de patentes concedidas pela análise micro..... | 46 |
| Tabela 4.4 Análise micro – Estágio atual..... | 51 |

1. Introdução

1.1 Motivação

As atividades humanas geram resíduos que normalmente são descartados por serem considerados inúteis. No entanto, muitos desses resíduos podem ser reutilizados e, ao serem gerenciados corretamente, podem se tornar um insumo para produção industrial ou geração de energia.

Com o estilo de vida baseado em altos índices de consumo adotado pelas grandes cidades ao longo dos anos, a gestão desses resíduos se tornou um dos grandes problemas do nosso tempo. Cidadãos, empresas e governos estão buscando meios de reduzir a quantidade crescente de resíduos descartados, assim como meios de reutilizá-los ou de fazer o seu descarte de forma segura e econômica. (TECHOBANOGLIOUS, 2002)

No Brasil, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS), instituída pela Lei Federal nº 12.305/2010, determina diretrizes gerais e instrumentos a serem adotados pela União, estados e municípios na gestão dos resíduos sólidos. Ela classifica os resíduos sólidos urbanos (RSU) como resíduos domiciliares (RDO), que são os provenientes de atividades domésticas, e resíduos de limpeza urbana (RLU), provenientes de serviços de limpeza urbana. Também define a ordem para a gestão de resíduos sólidos a ser adotada pelos entes da federação: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição ambientalmente adequada dos rejeitos. Além disso, ela distingue resíduo – material que pode ser reaproveitado ou reciclado – de rejeito – não passível de reaproveitamento ou reciclagem e que, portanto, deve ser destinado à disposição final.

De acordo com o relatório de perspectivas de urbanização mundial da Organização das Nações Unidas (ONU), em 2018, 55% da população mundial vivia em áreas urbanas. Essa proporção deve aumentar para 68% até 2050.

O relatório mostra que, somando o crescimento da população mundial com a migração de pessoas de áreas rurais para áreas urbanas, poderão ser

adicionadas 2,5 bilhões de pessoas às áreas urbanas até 2050, e isso adicionará desafios ao gerenciamento de resíduos. Cidadãos, empresas e governantes provavelmente precisarão assumir maiores responsabilidades pela gestão e gerenciamento destes, já que resíduos não coletados podem servir de alimento e hospedagem para vetores de doenças, como ratos e insetos. Portanto, o RSU mal administrado tem um enorme impacto na saúde, no ambiente local e global e na economia.

Nesse contexto atual de acelerado crescimento mundial, o fluxo de informações e de desenvolvimento tecnológico, conhecido como o fluxo de conhecimento das economias modernas, também observa um crescimento exponencial acentuado, o que faz com que a inclusão de inovações em cadeias produtivas se torne uma verdadeira vantagem competitiva. Uma boa gestão do conhecimento tecnológico traz como pressuposto a antecipação de possíveis novas tecnologias ou de necessidades emergentes (Teixeira, 2013).

Considerando-se este cenário de rápida evolução do conhecimento é necessário que empresas e organizações estejam dispostas a criar ambientes seguros que incentivem a produção de tecnologia, podendo então absorver todo conhecimento gerado, por meio de métodos, técnicas, práticas e ferramentas. As empresas precisam tomar decisões com embasamento adequado no que diz respeito ao estabelecimento de prioridades para os setores de pesquisa e desenvolvimento e ao gerenciamento dos riscos das inovações tecnológicas dos produtos, serviços e processos (Porter, 2004).

Tendo isso em vista, tem sido cada vez mais frequente a busca de ferramentas que as auxiliem na análise e no gerenciamento de toda a informação produzida, tanto com as informações exteriores quanto com as produzidas internamente. Dentre as ferramentas de análises existentes, os estudos prospectivos buscam agregar valor à essa enorme quantidade de informações do presente, transformando-as em conhecimento (Santos, 2004).

Segundo Kupfer e Tigre (2004) a prospecção tecnológica pode ser definida como: “um meio sistemático de mapear desenvolvimentos científicos e tecnológicos futuros capazes de influenciar de forma significativa uma indústria, a economia ou a sociedade como um todo”. Alguns exemplos do impacto que esse mapeamento pode trazer incluem a antecipação de novas tecnologias capazes de causar consideráveis mudanças na indústria, permitir uma análise dos estudos que estão sendo realizados por concorrentes, além de auxiliar o planejamento a curto, médio e longo prazo, no sentido de que permite empresas, centros de pesquisas e universidades a possibilidade de se avaliar com uma maior segurança em quais tecnologias investir e qual o caminho mais promissor para se alcançar o resultado pretendido.

1.2 Objetivos

Com o exposto, o presente trabalho tem como objetivo geral desenvolver um *roadmap* tecnológico da geração de energia a partir de RSU, utilizando a ferramenta de prospecção tecnológica.

Para tal, os seguintes objetivos específicos devem ser alcançados:

- a) compreensão da metodologia de prospecção tecnológica;
- b) caracterização dos RSU e identificação das tecnologias mais conhecidas para a geração de energia a partir do RSU;
- c) levantamento de artigos científicos, patentes concedidas e patentes depositadas sobre a geração de energia a partir do RSU nas bases de dados correspondentes.

Estes tópicos estão divididos em quatro capítulos, seguidos da conclusão. O Capítulo 2 detalha como estrutura-se a pesquisa de prospecção tecnológica. O capítulo 3 apresenta as principais características dos RSU e as principais tecnologias para o seu tratamento com geração de energia. Capítulo 4 está relacionado com a pesquisa prospectiva e análise dos resultados obtidos.

No Capítulo 5 a elaboração da construção do *roadmap* e sua análise é apresentada. Por fim, no Capítulo 6 são apresentadas as conclusões do trabalho, além de sugestões para estudos futuros.

2. Prospecção Tecnológica

Existem diversas formas previstas na literatura como possíveis para se realizar um estudo prospectivo e, para encontrar o que melhor se adequa às necessidades de uma empresa ou organização é necessário que seja pensado anteriormente qual o setor que será analisado pelo estudo e qual o objetivo que se espera ser alcançado ao final. Alguns dos métodos, exemplificados por Borschiver (2016), através dos quais o estudo prospectivo pode ser realizado incluem:

- 1) cenários – criação de situações futuras, eventos hipotéticos que procuram captar e prever possíveis situações de risco e visualizar saídas;
- 2) entrevista – realização de entrevistas com perguntas pensadas anteriormente, visando informações de grande complexidade e precisão;
- 3) *technology roadmap* – criação de estratégias de planejamento por meio do monitoramento ao longo do tempo e estabelecimento de tendências sobre um determinado assunto;
- 4) *brainstorming* ou “chuva de ideias” - consiste na estruturação de uma equipe que tem como objetivo escrever o maior número de informações possíveis sobre determinado assunto. Em um segundo momento, as informações são filtradas e avaliadas pela equipe, de forma a se constatar quais as melhores soluções para o caso em análise;
- 5) matriz SWOT – objetiva montar uma matriz para analisar fatores internos que representam forças e fraquezas e fatores externos que representem oportunidades e ameaças;
- 6) análise de tendências – utilização da matemática, por exemplo a regressão linear, para prever o comportamento de uma variável com base no seu comportamento passado;
- 7) análise de patentes e artigos científicos – consiste em analisar patentes e artigos científicos para melhor entendimento sobre o que está sendo estudado e criado.

É comum que um estudo prospectivo envolva o uso de mais de um método ou técnica, quantitativos e qualitativos, de modo a complementar as características

diferentes de cada um (Coelho, 2005). Nesse trabalho, será realizada a prospecção tecnológica por meio da análise de patentes e artigos científicos e a construção de um *roadmap* tecnológico.

2.1 Análise de Patentes e Artigos Científicos

Para que uma pesquisa seja conhecida na comunidade científica, o trabalho de pesquisa deve ser publicado em periódicos ou apresentado em congressos. A divulgação dos resultados de uma pesquisa torna possível o conhecimento, questionamento e a avaliação desse trabalho por outros profissionais (Piazzani, 2008). Para além disso, a divulgação dos resultados de uma pesquisa em periódicos garante a autoria de quem os desenvolveu.

Um artigo científico, pode ser considerado uma literatura base para validar estudos já existentes e motivar possíveis novos. Por ser considerado uma fonte de informação original e de qualidade, se estabelece como um meio de transmitir o conhecimento produzido por pesquisadores (Borschiver, 2016).

Outra forma de analisar o desenvolvimento tecnológico de um tema específico é a análise de patentes. De acordo com o Instituto Nacional de Propriedade Intelectual (INPI, s.d.), órgão brasileiro que regula a concessão de patentes, uma patente é:

“Um título de propriedade temporária sobre uma invenção ou modelo de utilidade, outorgado pelo Estado aos inventores ou autores ou outras pessoas físicas ou jurídicas detentoras de direitos sobre a criação. Com este direito, o inventor ou o detentor da patente tem o direito de impedir terceiros, sem o seu consentimento, de produzir, usar, colocar à venda, vender ou importar produto objeto de sua patente e/ ou processo ou produto obtido diretamente por processo por ele patenteado. Em contrapartida, o inventor se obriga a revelar detalhadamente todo o conteúdo técnico da matéria protegida pela patente”.

Patentes e artigos científicos podem ser considerados referência quando o quesito é inovação, e podem ser utilizados, como realizado no presente estudo, para medir o desenvolvimento de um assunto específico. Podemos comparar e monitorar as atividades de pesquisa de um setor analisando o número de pedidos de patentes, tendo em vista que eles estão diretamente ligados às atividades de pesquisa e desenvolvimento (P&D). É internacionalmente conhecido que o número de patentes é considerado como um dos indicadores de maior relevância na avaliação da capacidade de um país na transformação de conhecimento produzido em âmbito científico em um produto capaz de ser inserido e usufruído pela sociedade (Borschiver, 2016).

Em razão do fato das patentes possuírem uma enorme acessibilidade, podendo ser acessadas por meios eletrônicos, abrangerem todos os setores tecnológicos e serem amplamente utilizadas no mundo inteiro para divulgação de tecnologias, o estudo realizado por meio delas se demonstra vantajoso.

Ao se analisar um assunto com base em artigos científicos e patentes, várias informações podem ser extraídas. Um tipo de análise qualitativa e quantitativa é a divisão em:

- Análise Macro: países com maior número de patentes e maior diversidade de possíveis titulares como, por exemplo, universidades, empresas ou organizações;
- Análise Meso: categorização dos documentos de acordo com os aspectos mais relevantes para o assunto;
- Análise Micro: cada parte da análise meso é destrinchada e são identificadas particularidades de cada aspecto.

2.2 Technology Roadmaps

Essa técnica tem origem na indústria automotiva americana. No final dos anos 70 e início dos anos 80, ela foi adotada por meio de processos sistemáticos pela Motorola (Coelho, 2005), com o objetivo de dar uma maior atenção ao futuro

tecnológico da empresa, prover um veículo com o qual fosse possível realizar previsões e comunicar o restante da empresa quais tecnologias iriam necessitar um maior desenvolvimento e aplicação, portanto, objetivando alinhar o desenvolvimento dos seus produtos e tecnologias (Willyard, 1987).

Após a implementação de tal técnica pela Motorola, várias empresas começaram a utilizar o *roadmap* tecnológico como ferramenta para gestão e planejamento, tendo em vista que essa técnica possibilita uma análise do ambiente, o monitoramento de tendências ao longo do tempo, estuda possíveis trajetórias tecnológicas, auxilia na visualização de todos os atores de um setor simultaneamente e identifica possíveis novas oportunidades (Borschevier, 2016).

Algumas das principais áreas de aplicação dessa ferramenta incluem o planejamento de produtos, serviços e capacitações, planejamentos estratégicos e de longo prazo, e o planejamento de projetos e processos. Outra característica do documento é a possibilidade de ele ser utilizado em diversos formatos, como em barras, gráficos, fluxos, tabelas, múltiplos níveis (Borschevier, 2016).

Technology roadmapping é o processo com o objetivo de auxiliar no planejamento estratégico de desenvolvimento de mercado, produto e tecnologia de maneira integrada ao longo do tempo. O produto esperado desse processo é o *roadmap* ou mapa.

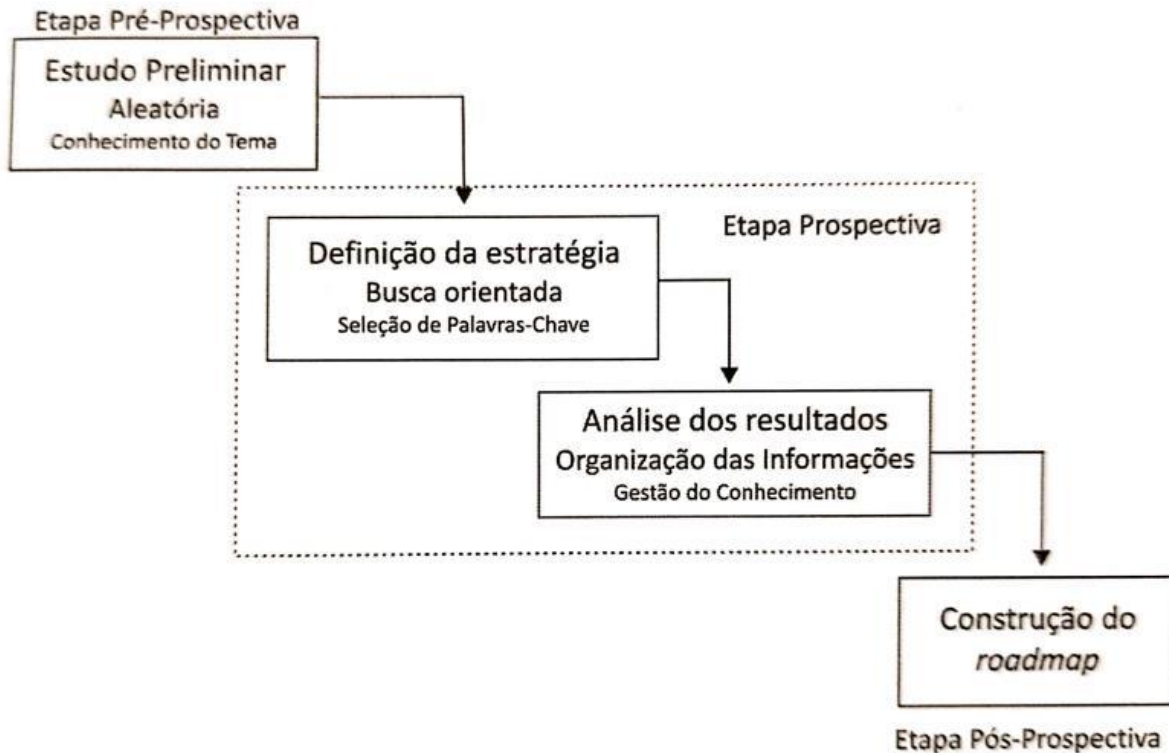
Os *roadmaps* conectam e buscam, através de metas, cronogramas e planos, um alinhamento entre o mercado e a aplicação do produto, com o seu planejamento, e com os materiais e insumos do processo.

2.3 Metodologia

Neste estudo será abordada a metodologia desenvolvida por Borschiver (2016) adaptada para o setor de geração de energia a partir do RSU, que consiste em utilizar a ferramenta de análise de artigos e patentes para a construção de um *roadmap*.

A pesquisa é dividida em 3 etapas principais, conforme demonstrado na Figura 2.1.

Figura 2.1: Metodologia para elaboração de um *roadmap*.



Fonte: Borschiver (2016)

- **Etapa pré-prospectiva:** esta etapa consiste em uma busca preliminar geral sobre o tema a ser estudado, de forma a se obter um conhecimento básico no assunto. Nessa fase não é necessário a busca em periódicos ou bases de patentes, é uma busca aleatória, um primeiro contato com o tema.
- **Etapa prospectiva:** esta etapa é caracterizada pela busca direcionada em bases de dados especializadas e a análise dos dados obtidos. Ela pode ser dividida em duas etapas:
 - 1) Definição da estratégia – Busca orientada: objetiva estabelecer uma relação entre as informações, assim como estabelecer uma dinâmica de difusão entre o tema e sua aplicação tecnológica:

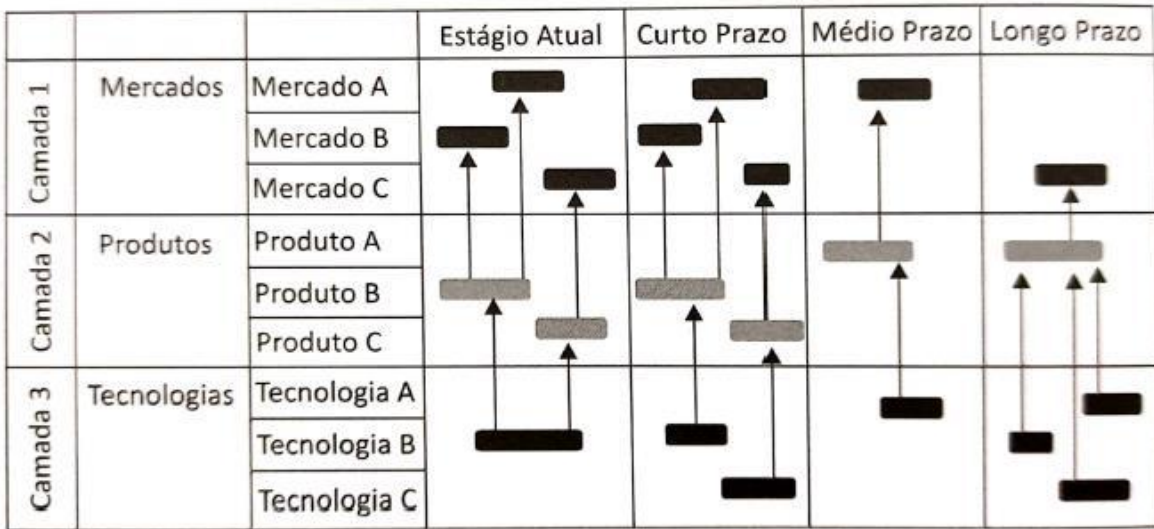
- estágio atual: análise de artigos provenientes de mídia especializada, sites de empresas, organizações;
- curto prazo: análise de patentes concedidas. Como já houve proteção da tecnologia, teoricamente ela está mais próxima de sua fase comercial;
- médio prazo: análise de patentes depositadas ou pedidos de patentes. Pela proteção ainda estar em análise, a tecnologia se encontra um pouco mais distante da fase comercial do que na fase anterior;
- longo prazo: análise de artigos científicos em estágio de pesquisa, que demonstrem um grau inicial do desenvolvimento da tecnologia.

2) Análise dos resultados – Organização das informações: objetiva organizar todas as informações contidas nos documentos analisados. É nesta etapa em que as taxonomias vão ser definidas para a construção do mapa. Tais informações podem ser estruturadas em planilhas eletrônicas, onde as colunas serão os dados extraídos dos documentos. Por exemplo: título, ano, país, titular, origem do titular, palavra-chave, assunto (se o documento fala de um processo específico, um equipamento, um produto).

- **Etapa pós-prospectiva**: é a etapa de construção do *roadmap*. Todas as informações analisadas e organizadas nas etapas anteriores vão constituir o mapa.

Na Figura 3.2 é possível observar um exemplo de um modelo genérico de mapa proposto por Borschiver (2016) adaptado de Phaal (2003). No eixo horizontal, encontra-se a divisão temporal em Estágio Atual, Curto Prazo, Médio Prazo e Longo Prazo. O eixo vertical é composto por camadas, que podem ser divididas de diversas maneiras, uma delas apresentada na Figura 2.2. E, por fim, as setas verticais saem do titular do documento, seja ele uma universidade, empresa ou organização e vai até as taxonomias que aquele documento aborda.

Figura 2.2: Modelo genérico de um roadmap.



Fonte: Borschiver (2016) adaptado de Phaal (2003).

3. Etapa Pré-prospectiva

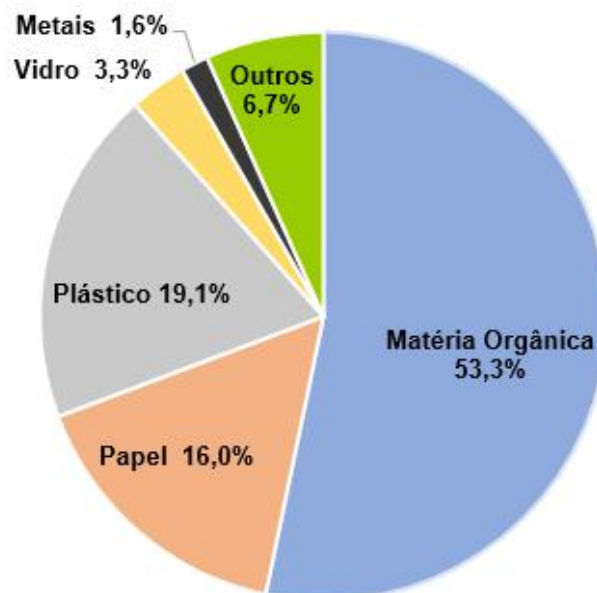
3.1 Resíduos Sólidos Urbanos

Os níveis globais de geração de RSU em 2016 foram de aproximadamente 2,01 bilhões de toneladas, e estima-se que esse valor deve aumentar para 3,4 bilhões de toneladas por ano até 2050 (KAZA *et al.*, 2018). Já no Brasil, no ano de 2019 foram geradas 79 milhões de toneladas de RSU. Com base no crescimento da população brasileira no período, que foi cerca de 0,40 %, em média cada brasileiro gerou pouco mais de 1 kg de resíduo por dia (ABRALPE, 2020).

A composição gravimétrica dos resíduos pode incluir: materiais orgânicos, papel, plástico, vidro, metais e outros. Esta é influenciada por muitos fatores, como localização geográfica, nível de desenvolvimento econômico, normas locais, fontes de energia e clima.

Conforme a Figura 3.1, que demonstra a composição em massa dos resíduos sólidos urbanos do estado do Rio de Janeiro em 2013, podemos observar que a maior parte é constituída por matéria orgânica, seguido de plásticos e papéis como segundo e terceiro maiores constituintes.

Figura 3.1: Composição do RSU no estado do Rio de Janeiro



Fonte: Elaboração própria com base em SEA, 2013

Um dos desafios que engloba a gestão de RSU é a coleta. Nos países de alta renda a taxa de coleta é elevada, cerca de 96 % do RSU é coletado, em contrapartida nos países de baixa renda esse valor cai para 39 % (KAZA, 2018). No Brasil o percentual obtido em 2019 parece promissor, tendo em vista que 92 %, cerca de 72,7 milhões de toneladas, foi coletado. Porém, tal informação ainda demonstra que 6,3 milhões de toneladas de resíduos não foram recolhidos. Comparado com 2017, a taxa coletada teve uma alta de 1,66 %, o que mostra que a coleta aumentou em um número um pouco maior do que a geração (ABRELPE, 2020).

De acordo com a ABRELPE (2019) cerca de 73 % dos municípios brasileiros fazem algum tipo de coleta seletiva, entretanto, em muitos deles, essas atividades não abrangem todos os bairros. Esses dados, entretanto, divergem dos dados da associação Compromisso Empresarial para Reciclagem (CEMPRE), que informa que em 2018 esse percentual foi de 22 % (CEMPRE, 2019).

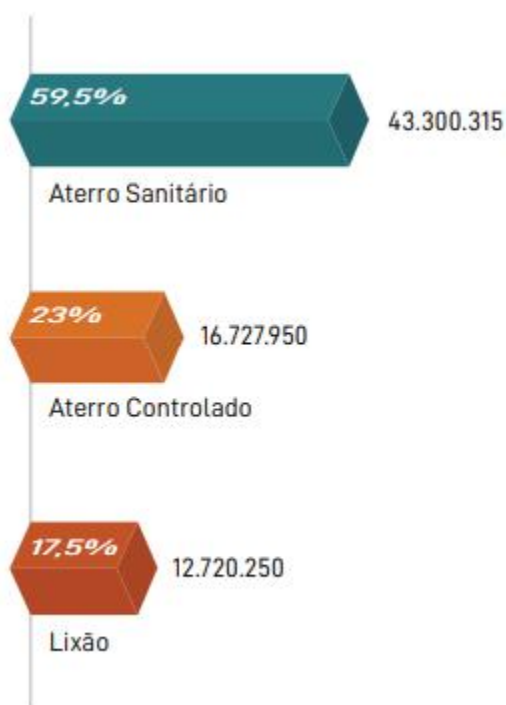
Em relação à disposição final dos resíduos sólidos urbanos, no Brasil temos três tipos principais de destino:

- a) Aterros sanitários: segundo a norma ABNT NBR 8419/1984, é “uma técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais”. Os aterros sanitários confinam o RSU em camadas cobertas com material inerte e contam com um sistema de drenagem para o chorume (líquido tóxico que resulta da decomposição do lixo), além da captação dos gases liberados, como metano.
- b) Aterro controlado: são lugares onde o RSU é disposto de forma controlada, o solo recebe uma cobertura para os resíduos, que não é impermeabilizada, e não possuem sistema de dispersão de gases nem recolhimento do chorume gerado.
- c) Lixões: são grandes depósitos a céu aberto, que não fornecem nenhum tratamento adequado para o RSU. Geralmente são localizados longe

dos grandes centros urbanos e não possuem nenhum critério sanitário de proteção ao meio ambiente, contaminando o solo, ar, água e lençol freático dos arredores, além de atrair vetores de doenças.

Conforme pode ser observado na Figura 3.2, dos 72,7 milhões de toneladas coletadas, 59,5 % teve disposição final adequada e foi encaminhada para aterros sanitários. Isso significa que um percentual de 40,5 % ainda é destinado a locais inadequados, como os lixões e aterros controlados, elevando o potencial de poluição ambiental e aumentando possíveis impactos na saúde populacional (ABRELPE, 2019).

Figura 3.2: Disposição final de RSU pelo tipo de destinação (T/ANO)



Fonte: ABRELPE (2020, p.21)

Segundo a ordem de gestão dos resíduos sólidos da PNRS presente no Art. 9º da Lei nº 12.305/10, antes da disposição final ainda há a reutilização, a reciclagem e o tratamento de resíduos.

Para reciclagem - processo entendido como transformação de resíduos que envolve a alteração das propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas e que dá origem a novos insumos ou produtos (ABRELPE, 2019) - a legislação estabelece

instrumentos para a implementação do princípio da responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos. Um exemplo é a logística reversa, onde os fabricantes, importadoras ou distribuidoras de agrotóxicos, pilhas e baterias, pneus, óleos lubrificantes, lâmpadas fluorescentes e produtos eletrônicos são obrigados a estruturar e implementar sistemas com o retorno do produto e de sua embalagem após o uso pelo consumidor.

Dados da Associação Nacional dos Catadores e Catadoras de Materiais Recicláveis (Ancat), junto a dados do programa Dê a Mão para o Futuro – Reciclagem, Trabalho e Renda, mostram que em 2018, 184 mil toneladas de resíduos recicláveis foram coletados (ABRALPE 2018).

Ainda segundo a ordem estabelecida na PNRS, após a reciclagem temos o tratamento de resíduos e, dentro dessa classificação, a recuperação energética é uma alternativa concreta, uma vez que os trata, possibilitando a recuperação de algum componente neles contido, assim como a redução do volume de resíduos que vão para o solo (ABRELPE, 2012). Com a tecnologia, por meio de diversos processos é possível transformar os resíduos em energia elétrica ou térmica, que, além de ser uma das soluções para a destinação final dos RSU não recicláveis recomendada pela ONU (ABRELPE, 2012), traz diversos benefícios, como:

- redução da emissão de gases do efeito estufa dos aterros sanitários;
- possibilidade de recuperação energética mais eficiente de resíduos que não estariam sendo utilizados;
- substituição das fontes fósseis de energia;

Diante dos diversos benefícios que a utilização de RSU para geração de energia tem, a Associação Brasileira de Biogás (Abiogás), juntamente com as associações: Associação Brasileira de Cimento Portland (ABCP), Associação Brasileira de Empresas Tratamento de Resíduos e Efluentes (Abetre), ABiogás e Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE), tem se movimentado para a criação, divulgada dia 02 de junho de 2020, da Frente Brasil de Recuperação Energética de Resíduos – FBRER. Esta

Frente tem como objetivo divulgar informações, propor políticas públicas e estudar a viabilização de projetos de geração de energia a partir de RSU (ABILOGÁS, 2020)

3.2 Tecnologias

Para tal aproveitamento energético a partir do RSU, é necessário um estudo das alternativas de tecnologias possíveis para esse processo. A seguir estão apresentadas as principais tecnologias para a geração de energia a partir do RSU.

3.2.1 Digestão Anaeróbia

O processo de Digestão anaeróbia ocorre a partir da decomposição da matéria orgânica, na ausência do oxigênio, em que, por meio de reações bioquímicas interdependentes, os compostos orgânicos presentes no RSU são degradados por diferentes grupos de microrganismos, gerando assim o biogás (FERREIRA, 2015). Este, por ser uma fonte de energia renovável, pode ser usado para a produção de eletricidade, calor e combustível, sendo a última de maior vantagem do processo (EUROPEAN COMMISSION, 2006b).

Antigamente, a maior parte dos processos de digestão anaeróbia aconteciam em lagoas anaeróbias e ao longo dos anos, os processos foram aperfeiçoados para a produção em tanques fechados com equipamentos de aquecimento e de mistura (ESPIRITO SANTO FILHO, 2013).

A matéria orgânica destinada à digestão anaeróbia passa por um pré-tratamento mecânico, que pode ser realizado sob condições úmidas ou secas, onde materiais como plásticos, metais, vidros e materiais muito grandes são removidos (EUROPEAN COMMISSION, 2006b). Em seguida, para a obtenção de um material homogêneo, a matéria-orgânica passa por uma redução de tamanho, que pode ser feita por meio de trituração (FERREIRA, 2015).

As tecnologias de digestão anaeróbia podem ser classificadas em relação ao:

a) Teor de Umidade

- De via úmida (*wet digestion*): o resíduo sólido é diluído com água de processo ou com líquido do resíduo para alimentar o digestor com uma mistura diluída (EUROPEAN COMMISSION, 2006b). Geralmente utilizado para tratar resíduos alimentares, dejetos de animais, ou seja, resíduos que apresentam elevado teor de umidade em sua composição (FERREIRA, 2015).

- De via seca (*dry digestion*), esse processo tem uma menor taxa de geração de efluentes líquidos e menores volumes de reatores, tendo em vista que a adição de água é dispensável nesse processo. Essa tecnologia demanda maiores custos de operação e manutenção, pois devido a elevada densidade do substrato, os reatores necessitam mecanismos robustos de mistura interna (FERREIRA, 2015).

b) Número de estágios

- De estágio único (*single step*): todas as etapas do processo de produção de biogás ocorrem ao mesmo tempo em um único reator, acarretando assim em menores custos de implementação e operação do reator (FERREIRA, 2015).

- De múltiplos estágios (*multi-step*): utiliza dois reatores, o que implica uma maior complexidade, maiores custos operacionais e necessita de uma maior área para a implantação da unidade (FERREIRA, 2015).

c) Regime de operação

- Por batelada: suportam maiores cargas orgânicas, entretanto, tem um menor rendimento de produção de biogás, tendo em vista que resultam em condições ambientais menos estáveis (FERREIRA, 2015).

- Por fluxo contínuo: resultam em condições ambientais mais estáveis, com maior taxa de conversão de matéria orgânica em biogás. Porém, demandam mais energia para o processo e maior custo de operação e manutenção (FERREIRA, 2015).

d) Temperatura

- Sistema mesófilo: trabalha com temperaturas entre 20 °C e 40 °C, possui bons rendimentos, é um processo estável e, sobretudo em países de clima tropical, não necessita de um sistema externo de aquecimento (FERREIRA, 2015).

- Sistema termófilo: trabalha com temperaturas entre 45 °C e 70 °C, possui maiores taxas de produção de biogás, possuem um maior custo devido à maior demanda energética para o aquecimento do reator (FERREIRA, 2015).

Além da produção em reatores, o biogás também pode ser produzido por meio da digestão anaeróbia em aterros sanitários. Apesar de apresentar uma menor porcentagem de metano, a produção em aterros sanitários gera cerca de 60% de metano. A composição do biogás e seu rendimento variam em relação à produção em aterros ou em biorreatores, assim como em função da característica do substrato. A produtividade do biogás é estimada com base na fração de proteínas, lipídeos e carboidratos presentes na fração orgânica seca (Ferreira, 2015). A Tabela 3.1 compara a composição do biogás produzido em reatores e em aterros sanitários.

Tabela 3.1: Composição do biogás

| Origem do biogás | Metano (%) | Dióxido de Carbono (%) | Sulfeto de hidrogênio (ppm) |
|--------------------|------------|------------------------|-----------------------------|
| Reatores | 50 - 80 | 25 - 45 | 20 - 30.000 |
| Aterros sanitários | 45 - 60 | 40 - 60 | 10 - 200 |

Fonte: Autoria própria com dados de (FERREIRA, 2015)

O biogás pode ser utilizado para produzir eletricidade, água quente para a indústria ao ser queimado em caldeiras, além de combustível alternativo ou ser injetado no gás natural. Dependendo do uso, o mesmo deve ser tratado, por exemplo, para remoção do sulfeto de hidrogênio.

3.2.2 Gaseificação

Gaseificação é um processo de conversão térmica no qual a combustão parcial de substâncias orgânicas a altas temperaturas, produz produtos que podem ser usados como matéria-prima ou como combustíveis (EUROPEAN COMMISSION, 2006a). O processo mais comum utiliza um agente de gaseificação, como por exemplo oxigênio, ar ou vapor quente, em quantidades inferiores à estequiométrica (SILVA, 2016), em temperaturas acima de 600 °C, podendo ser mais elevadas que 1.200 °C (LOMBARDI; CARNEVALE; CORTI, 2014).

O insumo passa pelas etapas de: aquecimento e secagem, desvolatilização, craqueamento térmico e gaseificação. E, dependendo da temperatura, pode gerar gás combustível, gás de síntese (composto principalmente por monóxido de carbono e hidrogênio) e carvão (IONESCU, 2012).

O processo pode ser classificado em relação ao meio de oxidação. Ele pode ser realizado pela oxidação parcial com ar, com ar enriquecido com oxigênio, com oxigênio puro, pela gaseificação a vapor ou por gaseificação por plasma. Se for oxidado com ar, gera um gás síntese diluído em nitrogênio (cerca de 60 %) que possui um poder calorífico considerado baixo, entre 4 e 7 MJ/m³_N. Ao ser oxidado com oxigênio puro, gera um gás de síntese quase livre de nitrogênio, o que aumenta seu poder calorífico para 10 a 15 MJ/m³_N. Para a gaseificação a vapor, o produto gerado é um gás síntese sem nitrogênio e com poder calorífico de 15 a 20 MJ/m³_N, esse processo precisa de uma fonte externa de energia para as reações endotérmicas, já que como o vapor é o único agente gaseificador, o processo não possui reações exotérmicas. No processo por plasma, a fonte de calor é um gás de plasma com temperatura muito elevada (até 15.000 °C), produzido a partir de tochas de arcos voltaicos, que permite o controle da temperatura do sistema independente da alimentação do reator e do suprimento de agente gaseificante. Portanto, no processo por plasma, pode haver alterações no tamanho da partícula da alimentação sem que isso afete o gás de síntese formado (ARENA, 2012).

Para a gaseificação, é recomendado um pré-tratamento a fim de reduzir o tamanho da partícula, limitar a natureza heterogênea dos resíduos e reduzir o teor de cinzas e umidade (ARENA, 2012).

Os gaseificadores podem ser divididos nos seguintes tipos:

- gaseificadores de leito fixo (corrente ascendente e descendente);
- gaseificadores de leito fluidizado (borbulhantes e circulantes);
- gaseificadores de fluxo arraste (*entrained flow*);
- gaseificadores de forno rotativo;
- gaseificadores de plasma;
- gaseificadores de grelha móvel.

Em relação ao tamanho das partículas de resíduos na alimentação, para gaseificadores de leito fixo e leito fluidizado circulante não deve passar de 100 mm. Para gaseificadores de leito fluidizado borbulhante o tamanho delas não deve ultrapassar 150 mm, e para os de grelha móvel 200 mm. Já para os de forno rotativo e de plasma, não há restrições de tamanho. A maior restrição de tamanho está no gaseificador de fluxo de arraste, que as partículas precisam ser menores que 1 mm (geralmente passando por um moedor como pré-tratamento) e precisam ser misturadas com lodo e a concentração da mistura não deve ser menor que 60 % de sólidos (ARENA, 2012).

3.2.3 Pirólise

Processo de conversão de biomassa em energia, em que a degradação térmica dos componentes ocorre na ausência parcial ou total de oxigênio, entre temperaturas de 300 a 1000 °C (PEDROZA *et al.*, 2017).

As frações submetidas ao processo de pirólise são principalmente: papel, tecido, plástico e resíduos de quintais. Já resíduos de alimentos devem ser separados anteriormente por conta de sua umidade (PEDROZA *et al.*, 2017). Portanto, a matéria-prima deste processo deve ser majoritariamente material orgânico, necessitando assim de um pré-tratamento. Após a triagem mecânica, para padronizar o tamanho das partículas, a matéria-prima deve passar por um processo

de moagem, e para aumentar seu poder calorífico, por um processo de secagem (IONESCU, 2012).

O processo de pirólise gera três fases: gasosa, líquida e sólida. Como apresentado na Tabela 3.2, ele converte um produto com baixa densidade energética (a biomassa) em frações líquida e sólida com alto potencial energético, além de em uma fração gasosa (SILVA, 2016).

Tabela 3.2: Teor energético dos produtos de pirólise comparado a biomassa

| | Biomassa | Fração Líquida (Bio-óleo) | Fração Sólida (Carvão vegetal) | Fração Gasosa |
|----------------------|-------------------------|------------------------------------|--------------------------------|---------------|
| Densidade Energética | ~ 1,5 GJ/m ³ | ~22 GJ/m ³ ou ~17 MJ/kg | ~18 MJ/kg | ~6 MJ/kg |

Fonte: SILVA, 2016

Três processos de pirólise se destacam na literatura: lenta (ou convencional), rápida e *flash*. Os parâmetros operacionais que se distinguem entre elas são: temperatura final, taxa de aquecimento, tamanho da partícula e tempo de residência. A faixa destes parâmetros para cada processo é apresentada na Tabela 3.3. O produto obtido depende do processo utilizado, a pirólise convencional favorece a produção de todas as frações (gás, bio-óleo e carvão), já o produto da pirólise rápida é composto majoritariamente da fração líquida, o bio-óleo. Já a pirólise *flash* gera principalmente bio-óleo e gás (SILVA, 2016).

Tabela 3.3: Comparação dos parâmetros operacionais para processos de pirólise convencional, rápida e flash

| Parâmetros Operacionais | Pirólise convencional | Pirólise rápida | Pirólise <i>flash</i> |
|------------------------------------|-----------------------|-----------------|-----------------------|
| Temperatura final de pirólise (°C) | 600 | 500 | <650 |
| Taxa de aquecimento (K/s) | 0,1 - 1 | 10 - 200 | >1000 |
| Tamanho da partícula (mm) | 5 - 50 | <1 | <0,2 |
| Tempo de residência do sólido (s) | 300 - 1800 | <2 | <1 |

Fonte: SILVA, 2016

Outro fator importante de ser analisado é o tipo de reator em que a pirólise ocorre, tendo em vista que ele representa de 10 a 15% de todo capital aplicado ao processo (SILVA, 2016). Eles podem ser dos seguintes tipos

- Leito Fluidizado (borbulhante e circulante)
- Leito Fixo
- Ablativa (cone rotatório e vórtice)
- Reator à vácuo

Os reatores de leito fluidizado borbulhante, de cone rotatório apresentam bom rendimento para a obtenção do produto de fração líquida. Entretanto o de cone rotatório necessita estar conectado a um segundo reator para fornecer calor ao reator de pirólise com a queima do material sólido gerado. Os reatores de leito fluidizado são de fácil acesso e construção (SILVA, 2016).

O bio-óleo, gerado pela pirólise de matéria orgânica, ou biomassa, é um líquido de alto poder calorífico e que não apresenta compostos sulfurados, o que permite que esse produto seja utilizado como biocombustível. Ele pode ser utilizado como emulsões para asfalto, como aditivos para gasolina e óleo diesel, e ainda em substituição à óleo diesel em caldeiras. Já a fração gasosa, também possui alto poder calorífico e é composta por hidrocarbonetos, hidrogênio, CO e CO₂, sendo o gás de síntese representativo na mistura. O carvão (parte sólida) também tem

muitas finalidades, como a substituição do carvão ativado comercial na remoção de metais pesados e substâncias orgânicas tóxicas de efluentes, assim como em caldeiras e fornos tubulares, fornos comerciais e uso doméstico em lareiras e churrasqueiras (PEDROZA *et al.*, 2017).

3.2.4 Combustão

A combustão é uma das tecnologias mais utilizadas para o tratamento do RSU, é conduzida por um conjunto de reações em altas temperaturas, onde o carbono e o hidrogênio do combustível (RSU) reagem com excesso de oxigênio (SILVA, 2016), produzindo energia e calor.

Quando a combustão é completa, o carbono e o hidrogênio presentes nos resíduos, juntamente com o enxofre, são oxidados produzindo dióxido de carbono, água e dióxido de enxofre, e parte do nitrogênio é convertida em óxidos de nitrogênio (DAVIS, 2016).

Os parâmetros operacionais que governam a combustão são (ROGOFF; SCREVE, 2011):

- Tempo: deve ser longo para garantir que as reações terminem. Normalmente entre 45 e 60 min.

- Temperatura: acima de 982 °C. Se a temperatura for insuficiente, a reação de combustão não é concluída e a temperatura do processo diminui.

- Turbulência do meio: fornecido pelo subsistema de grelhas que move os resíduos sólidos até o forno para misturá-los com o ar.

Além desses parâmetros, a mistura eficiente do ar e dos gases de combustão é outro fator importante para a combustão completa acontecer (DAVIS, 2016).

Quando há uma produção combinada de calor e energia denomina-se *combined heat and power* (CHP), e é possível utilizar até 80 % da energia dos resíduos nesse tipo de planta. Para realizar a conversão da energia elétrica, a planta deve conter também uma subestação elétrica, onde transformadores realizarão

essa conversão da energia gerada de baixa para alta tensão. Por volta de 10 a 20 % da produção de energia é utilizada dentro da planta, dependendo da capacidade da planta, o que não é utilizado é convertido em média tensão e entra na malha de distribuição elétrica (KALOGIROU, 2018).

Um sistema de combustão de resíduos sólidos com recuperação de energia, ilustrado na Figura 3.3, inclui, (KALOGIROU, 2018):

1 - Seções de armazenamento – possuem capacidade para armazenar de 4 a 7 dias de resíduos em capacidade de operação normalizada. São esvaziadas em uma rotação sequencial para evitar que os resíduos fiquem longos períodos em algumas partes, o que pode acarretar degradação dos resíduos e produção de odores;

2 - Câmara de combustão – existem três tipos de câmaras de combustão em uma planta de incineração de RSU: grelha móvel, forno rotativo e leito fluidizado. Sendo o mais encontrado o de grelha móvel.

3 – Caldeira – é responsável por resfriar os gases de combustão, nela a energia liberada na combustão é inicialmente recuperada como água quente ou vapor;

4 - Turbina a vapor/gerador – a eletricidade é produzida por meio do conjunto turbina a vapor/gerador. As turbinas a vapor usadas para a produção somente de eletricidade são chamadas de turbinas de condensação, já as turbinas a vapor usadas em plantas CHP podem ser classificadas em dois tipos: turbinas sem condensação e turbinas de extração;

5 - Controle de poluição de ar – os gases da combustão carregam resíduos da combustão incompleta do RSU e muitos poluentes nocivos, que tem sua concentração diretamente proporcional à composição do RSU e às condições da combustão. Esses gases carregam cinzas, metais pesados e compostos orgânicos e inorgânicos. Para evitar a emissão de poluentes, as plantas contam com o sistema de controle de poluição de ar, um sistema que precipita, adsorve ou transforma os poluentes. Os resíduos (cinza) desse sistema são denominados *fly ash*, e consiste

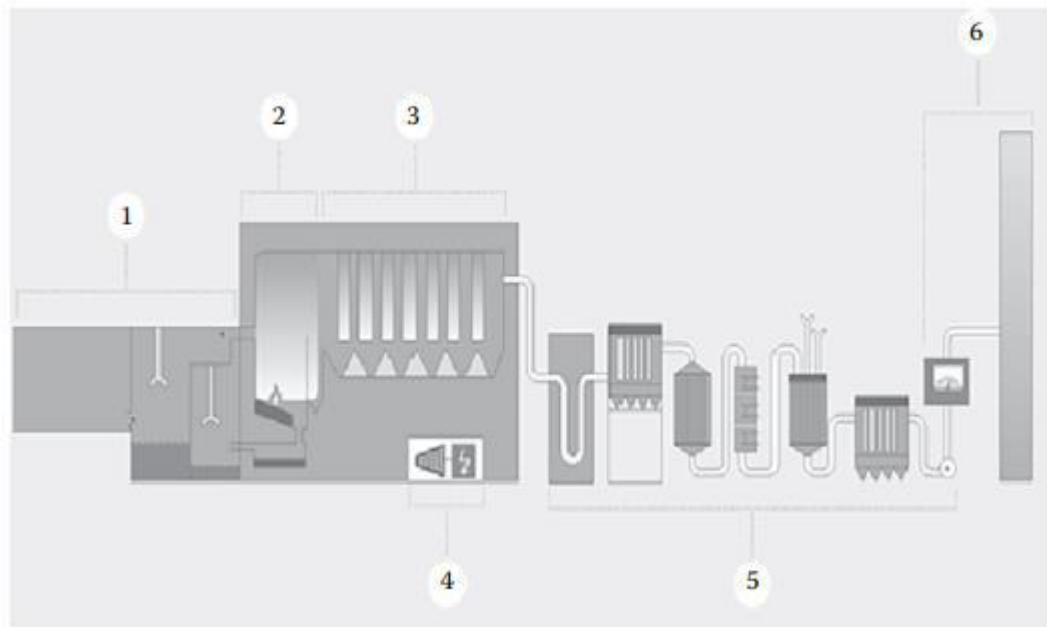
em partículas minerais, uma variedade de sais solúveis e compostos de metais pesados.

6 - Chaminé – a altura da chaminé é fundamental para a diluição dos gases de combustão na atmosfera e depende do nível de controle de emissão aplicado a planta.

A fração não combustível dos resíduos alimentados forma um resíduo (cinza) que permanece na grelha, esse material é conhecido por *bottom ash*, e consiste principalmente em vidro, cerâmica, metais ferrosos e não ferrosos e minerais.

Os resíduos do processo, tanto *fly ashes* quanto *bottom ashes* podem ser destinados à disposição em aterros, incineradas ou destinados à tratamentos e reutilizadas como por exemplo na pavimentação de rodovias.

Figura 3.3: Representação esquemática de uma planta de geração de energia a partir de RSU via combustão



Fonte: KALOGIROU (2018, p. 22)

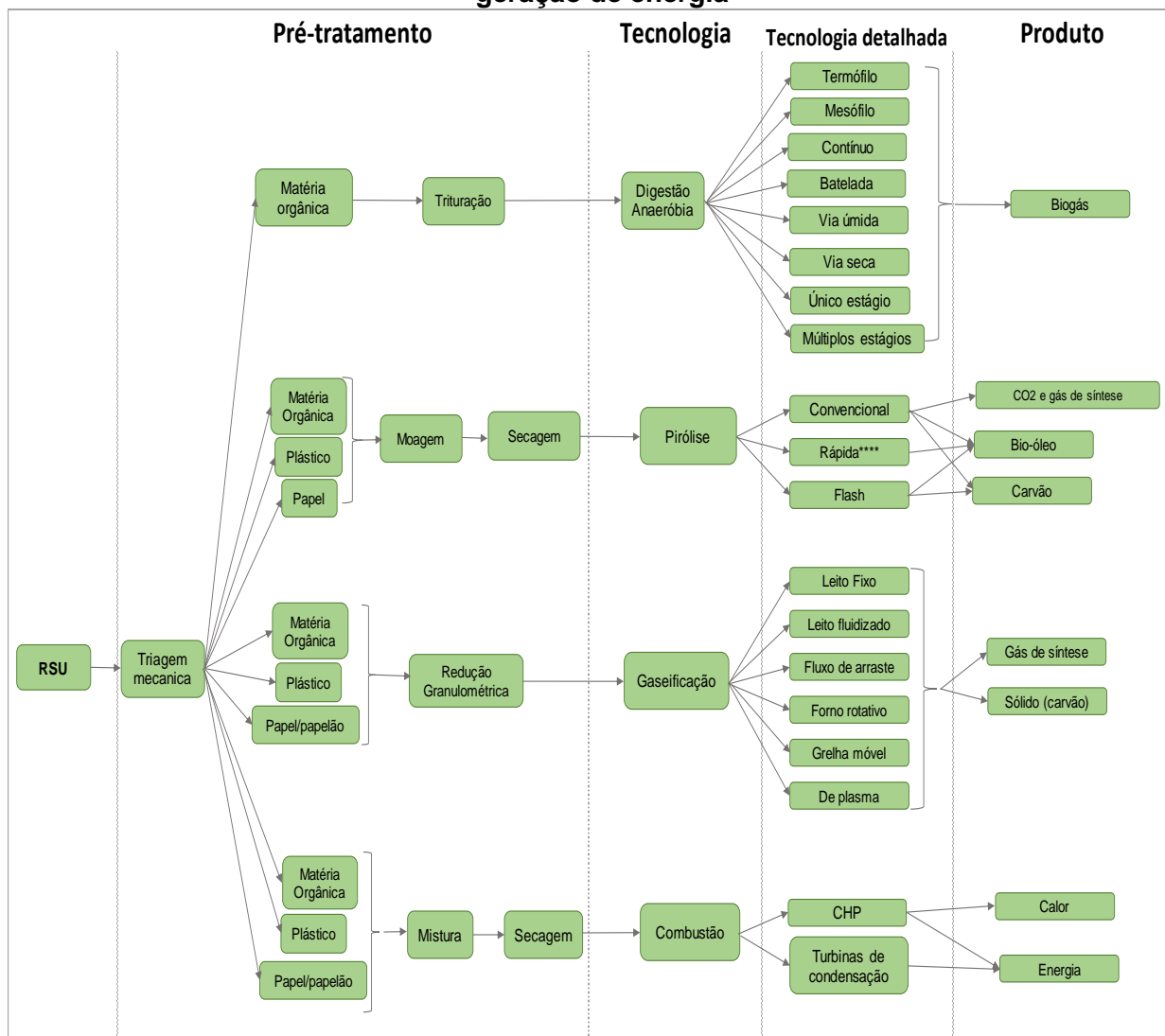
Para essa tecnologia pode-se implementar um pré-tratamento mecânico a fim de otimizar o processo, que vai remover materiais recicláveis, vidro e metais. Além da triagem, como os RSUs normalmente apresentam um teor de umidade de

20 a 25 % em peso, é necessário passá-lo por uma secagem visando aumentar a eficiência da combustão (ROGOFF; SCREVE, 2011).

3.2.5 Fluxograma

Com base nas informações da literatura apresentadas no presente capítulo, foi possível desenvolver um fluxograma, exibido na Figura 3.4, resumindo as tecnologias disponíveis na literatura para a geração de energia a partir de RSU para uma melhor visualização das tecnologias e seus produtos, separando-as por pré-tratamento, tecnologia, tecnologia detalhada e produto.

Figura 3.4 – Fluxograma das tecnologias de tratamento do RSU para geração de energia



Fonte: autoria própria

4. Etapa prospectiva

4.1 Longo Prazo - Artigos Científicos

4.1.1 Metodologia

A busca por artigos científicos, os quais no *roadmap* dizem respeito à prospecção a longo prazo, foi realizada em julho de 2020 por meio da base de dados Scopus (www.scopus.com) seguindo os seguintes parâmetros:

- Período analisado: janeiro de 2018 até julho de 2020
- Palavras-chave: ("*municipal solid waste*") AND ("*waste to energy*") OR ("*energy from waste*")

Para a seleção das palavras-chave o termo RSU foi traduzido para sua expressão em inglês mais utilizada: *municipal solid waste* (MSW). Além disso, as expressões em inglês *waste to energy* e *energy from waste*, muito utilizadas na geração de energia a partir de resíduos, também foram utilizadas. A fim de tornar a busca mais precisa, as aspas foram utilizadas para que assim a busca retornasse apenas artigos que continham a expressão como um todo, e não suas palavras soltas.

A busca resultou em 368 resultados que passaram por uma análise dos seus resumos. Essa análise levou em conta o tópico de interesse do trabalho, artigos que não citavam nenhuma tecnologia, abordando o tópico de forma superficial, ou que abordavam a geração de energia a partir de outros resíduos foram excluídos. Após a análise, 111 artigos foram considerados relevantes para o presente estudo, apresentados no Anexo A.

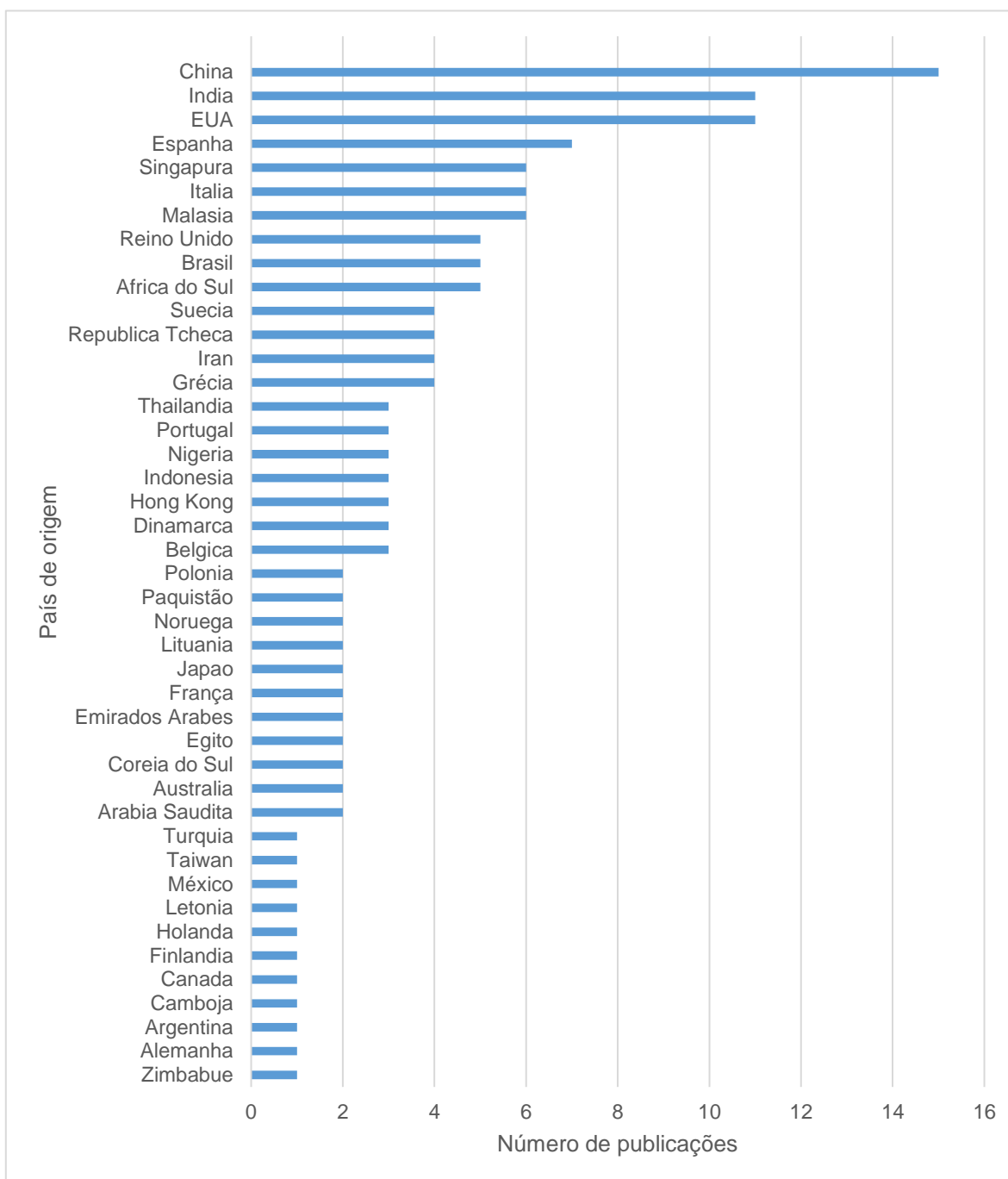
4.1.2 Análise Macro

A primeira análise realizada, apresentada na Figura 4.1, levou em conta o país de origem da publicação. A soma total do número de artigos por país é maior do que o número de artigos selecionados pois alguns artigos foram escritos por autores de diferentes países. A China destaca-se como país com maior número de artigos, tendo 15 documentos publicados, isso pode ser explicado pela enorme

expansão da incineração de RSU observada na última década no país (KUMAR; SAMADDER, 2017). Em seguida estão Estados Unidos e Índia, com 11 publicações cada. O Brasil encontra-se bem atrás com 5 publicações.

Separando as publicações por continente a Ásia e Europa destacam-se com 63 e 52 artigos, respectivamente. A maioria dos países europeus priorizou o desenvolvimento de políticas que adotam soluções integradas de gerenciamento de RSU, enquanto outros países foram mais lentos (OUDA; RAZA, 2014). Como a busca dos artigos foi realizada de 2018 a 2020, um período mais recente, é possível observar que o número de publicações de outros países fora da Europa foi maior que na Ásia, onde a geração de energia a partir do RSU foi desenvolvida mais recentemente (MAKARICHI; JUTIDAMRONGPHAN; TECHATO, 2018).

Figura 4.1: Artigos publicados por país

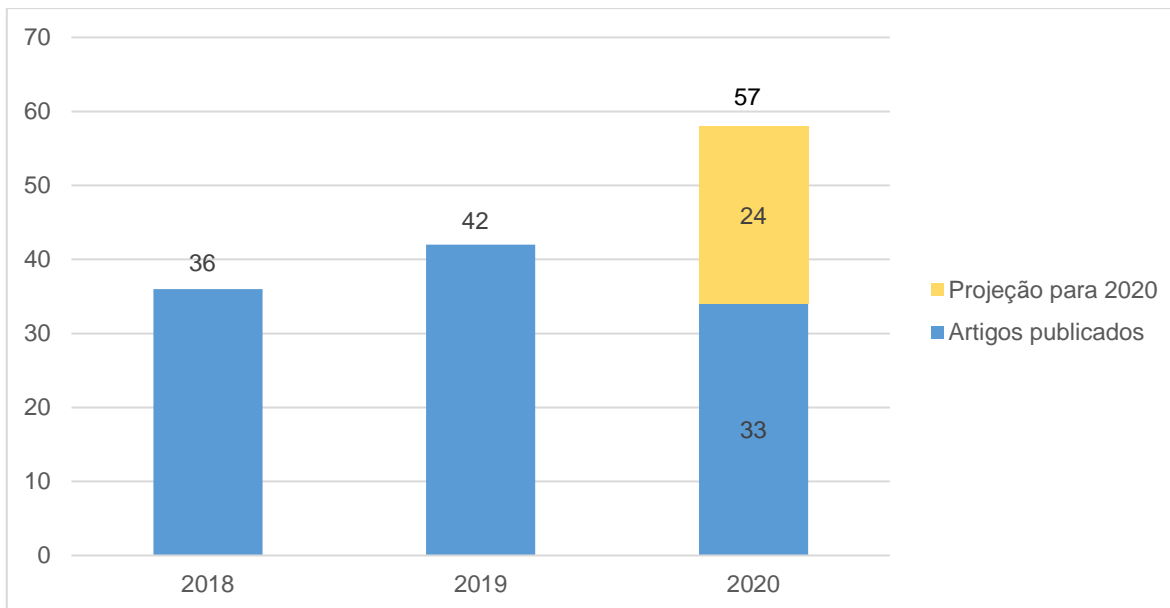


Fonte: Elaboração própria

Em relação ao número de artigos selecionados como relevantes por ano, a Figura 4.2 mostra o número de publicações pelos anos pesquisados. Dado que a pesquisa foi realizada em julho de 2020, para ser possível obter uma visualização do aumento ou não do número de artigos, foi realizada uma projeção linear para os

cinco meses de 2020 que não foram analisados. É possível observar um aumento a cada ano do número de publicações relacionadas a esse tema.

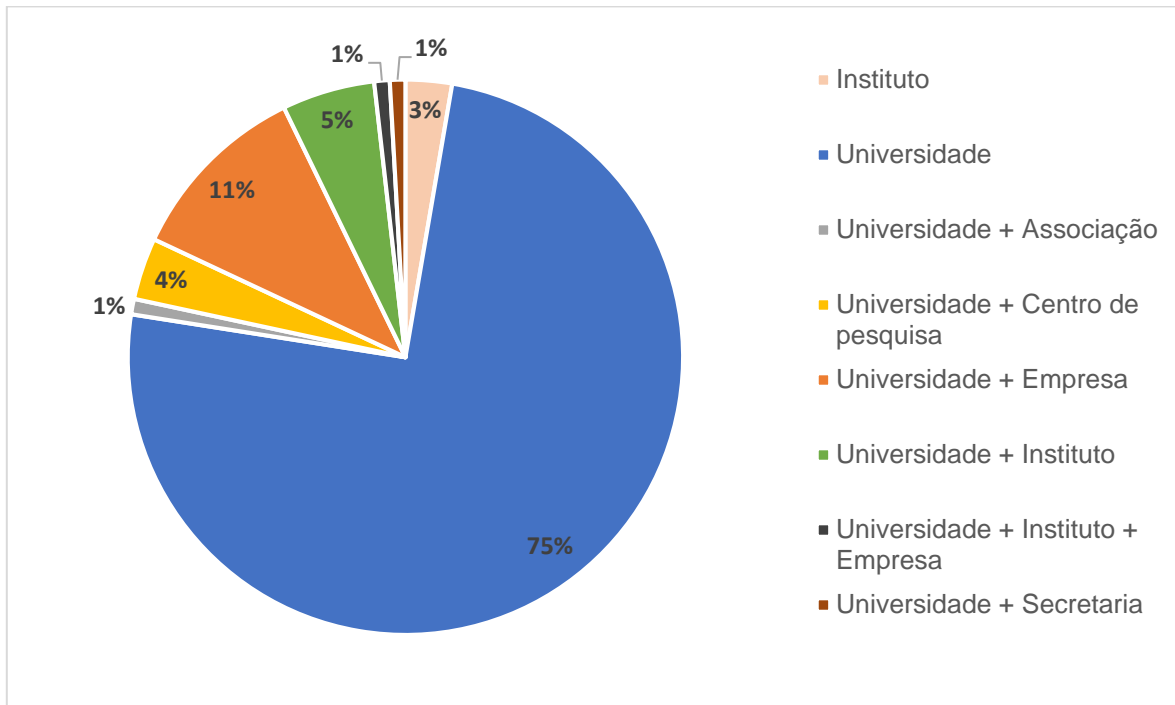
Figura 4.2 – Artigos publicados por ano



Fonte: Elaboração própria

Na análise do tipo de instituição, apresentada na Figura 4.3, as universidades ganham destaque com 86 das 111 publicações, e com a publicação em conjunto com empresas, institutos, centros de pesquisa. Ao todo, as universidades aparecem em 97 % das publicações selecionadas.

Figura 4.3: Artigos publicados por tipo de instituição

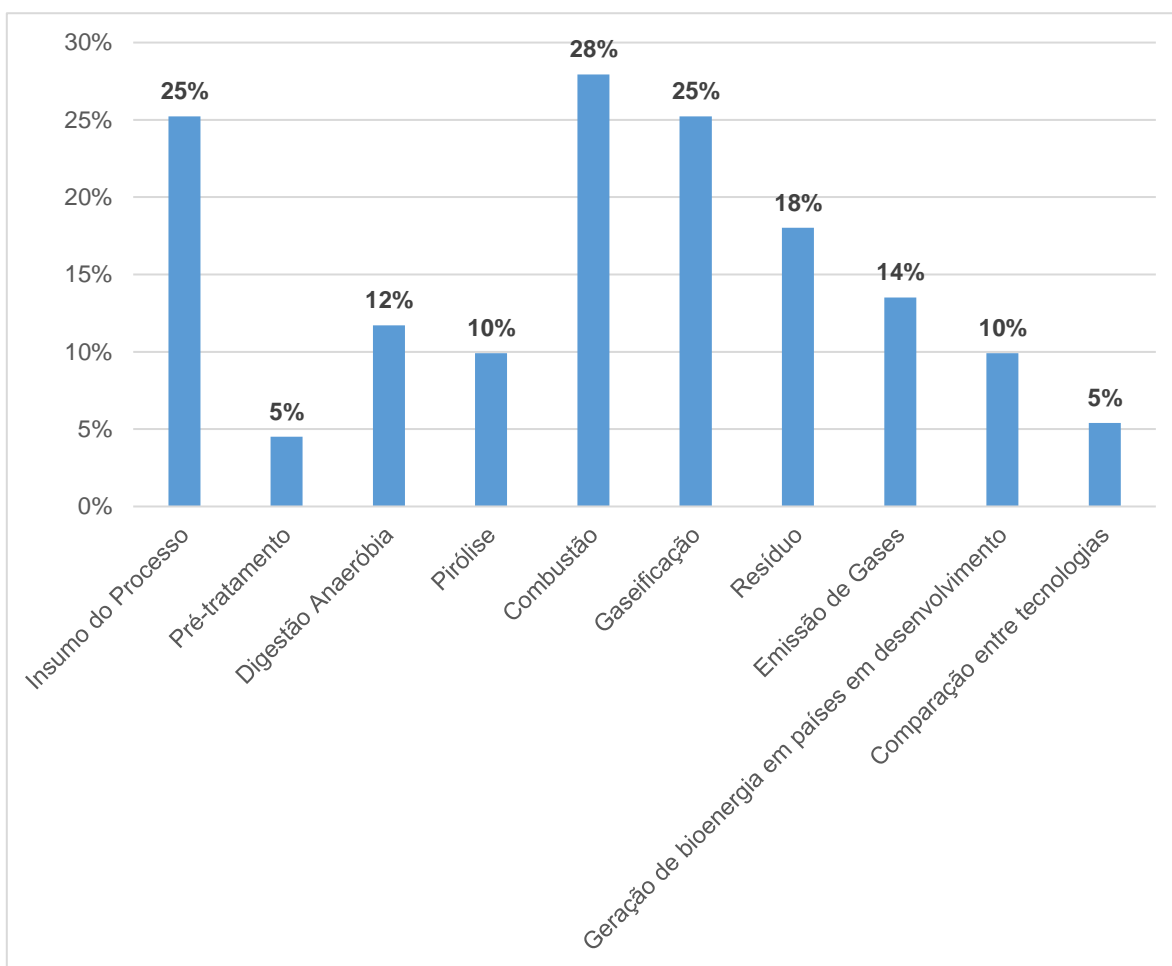


Fonte: Elaboração própria

4.1.3 Análise Meso

Considerando os aspectos relevantes para o tratamento do RSU com geração de energia levantados na etapa pré-prospectiva, foram elaboradas taxonomias. A Figura 4.4 apresenta a análise meso dos artigos selecionados em relação à essas taxonomias.

Figura 4.4: Análise meso: percentual de artigos em cada taxonomia



Fonte: Elaboração própria

Dos artigos analisados, muitos abordavam mais de uma taxonomia, sendo contabilizados então mais de uma vez. As pesquisas relacionadas à “Combustão” destacam-se com o maior número de publicações, com 31 artigos dos 111 analisados. As taxonomias “Insumo do Processo” e “Gaseificação” aparecem ambas com 28 artigos relacionados, já “Digestão Anaeróbia” e “Pirólise” aparecem em 13 e 11 artigos, respectivamente. “Pré-tratamento” foi abordado apenas por 5 artigos, todos debatendo a separação do RSU. Dos 111 artigos publicados, 15 falavam sobre “Emissão de Gases” e 20 sobre “Resíduos”, relacionados aos resíduos dos processos de geração de energia.

Duas taxonomias que não foram abordadas na fase pré-prospectiva surgiram após a análise dos artigos:

1) “Geração de bioenergia em países em desenvolvimento”: 11 artigos abordaram a geração de energia a partir do RSU como uma solução para o crescente volume de resíduos gerados em países em desenvolvimento.

2) “Comparação entre tecnologias”: 6 artigos comparavam as tecnologias de geração de bioenergia a partir do RSU, algumas das comparações encontradas foram entre pirólise e combustão, gaseificação e digestão anaeróbia, entre outras.

O somatório das porcentagens ultrapassa 100 % pois alguns artigos abordam mais de uma taxonomia, então foram contabilizados mais de uma vez.

4.1.4 Análise Micro

Na etapa micro, as taxonomias da etapa meso foram detalhadas.

Tabela 4.1 – Número de artigos pela análise micro

| Meso | Micro | Número de artigos |
|--------------------|---|--------------------------|
| Insumo do processo | Fração orgânica | 9 |
| | Coprocessamento | 7 |
| | Caracterização | 7 |
| | Potencial energético | 7 |
| | Incinerabilidade | 5 |
| | Contaminação por metais | 2 |
| | Plásticos | 2 |
| | Polímeros absorventes | 1 |
| Pré-tratamento | Separação | 4 |
| Digestão Anaeróbia | Condições do processo | 8 |
| | Digestor | 7 |
| | Sistema híbrido | 2 |
| | Cálculo de eficiência | 1 |
| | Recuperação de nutrientes e energia | 1 |
| Pirólise | Reator | 5 |
| | Sistema híbrido | 4 |
| | Pirólise convencional | 2 |
| | Pirólise Flash | 1 |
| | Condições do processo | 2 |
| | Produtos | 2 |
| Gaseificação | Gaseificações | 16 |
| | Condições do processo | 7 |
| | Gaseificação de Plasma | 6 |
| | Sistema híbrido | 6 |
| | Cálculo de eficiência | 4 |
| | Sólido Oxide Fuel Cell | 2 |
| | Produtos | 2 |
| Combustão | Sistema híbrido | 8 |
| | Câmara de combustão | 5 |
| | CHP | 7 |
| | Corrosão | 4 |
| | Oxy-fuel combustion (OFC) | 2 |
| | Eficiência / Potencial energético | 3 |
| | Condições do processo | 1 |
| | Turbinas de condensação | 1 |
| Emissão de Gases | Greenhouse gas | 4 |
| | SO ₂ ; NO _x ; CO, VOC, PM ₁₀ | 1 |
| | CO ₂ | 2 |
| | Mercúrio | 2 |
| | NO _x precursors | 2 |
| | PAHs | 2 |
| | Avaliação de impactos à saúde | 1 |
| Resíduos | Reuso das cinzas | 11 |
| | Recuperação de metais | 1 |
| | Caracterização | 4 |
| | Tratamento das cinzas | 4 |

Fonte: Elaboração própria

Em relação à taxonomia “Insumo do processo”, a fração orgânica do RSU aparece mais vezes, em 9 artigos dos 28. Essa taxonomia engloba as diferentes frações orgânicas que foram faladas nos artigos, alguns consideravam apenas papel, outros papel, madeira e tecido, outros frutas e vegetais

A abordagem de coprocessamento – cogaseificação, copirólise e codigestão- de RSU com outros materiais, como lodo, grama e hidrocarbonetos de petróleo foi encontrada em 7 artigos.

A caracterização do RSU, assim como o cálculo de um potencial energético para o RSU foram abordados em 7 artigos cada. A taxonomia potencial energético engloba artigos que discutem tanto o potencial de geração de energia do RSU quanto poder calorífico e a quantidade de energia gerada durante a combustão. *Incinerability*, um cálculo utilizado para quantificar a incinerabilidade de RSU aparece em 5 artigos. A contaminação do RSU por metais foi abordada em 2 artigos. Já artigos que abordam outros constituintes do RSU, como plásticos e polímeros absorventes, apareceram em menor quantidade, com 2 e 1 artigos respectivamente.

Em “Digestão Anaeróbia” a maior parte dos artigos, 8 dos 13 aborda condições do processo, como temperaturas mesofílicas e termofílicas ou se é um processo úmido ou seco. Em segundo lugar, a taxonomia mais citada foi o tipo de digestor utilizado no processo, com 7 artigos.

Para “Pirólise”, dos artigos 11 artigos relacionados ao tema 5 abordam o tipo de reator utilizado no processo como de leito-fixo e forno rotativo. Sistemas híbridos, de pirólise com CHP - um processo de combustão com produção combinada de calor e energia - e pirólise com gaseificação também são assuntos abordados, em 4 artigos. O tipo de pirólise, convencional, rápida ou *flash* também são abordados em alguns artigos.

Em seguida, na taxonomia “Gaseificação”, dos 28 artigos 16 abordavam o tipo de gaseificador utilizado no processo, sendo gaseificadores de leito fixo o tipo mais frequente, com 7 artigos, e gaseificadores de leito fluidizado o segundo mais abordado, com 3 artigos, em seguida aparecem gaseificadores de grelha móvel e de leito de arraste.

Artigos que abordavam as condições do processo, comparando a gaseificação de RSU em diferentes temperaturas por exemplo, também aparecem significativamente, com 7 artigos.

Gaseificação de Plasma e sistemas híbridos de gaseificação – com gaseificação e digestão anaeróbia, gaseificação e pirólise, e gaseificação e CHP- também foram taxonomias frequentes, estando presente em 6 artigos cada.

Na análise micro da taxonomia “Combustão” os temas mais abordados foram sistemas híbridos e a combustão CHP, com 8 e 7 artigos respectivamente. Os sistemas híbridos englobam sistemas contendo combustão e gaseificação, combustão e digestão anaeróbia ou combustão e turbinas a gás. A taxonomia câmara de combustão engloba os artigos que falam sobre os tipos de incinerador utilizado, como grelha móvel, forno rotativo, e corresponde a 5 artigos. Corrosão nos reatores também foi uma taxonomia que apareceu em 4 artigos.

4.2 Patentes Depositadas – Médio Prazo

4.2.1 Metodologia

Em relação a prospecção à médio prazo, para a análise de patentes depositadas, mas ainda não concedidas, foi realizada a busca em dezembro de 2020 na base de dados do governo dos Estados Unidos, *United States Patent and Trademark Office* (USPTO) (<https://www.uspto.gov>), seguindo os seguintes parâmetros:

- Período analisado: janeiro de 2015 até dezembro de 2020 – data em que as patentes foram analisadas pela base de dados
- Palavras-chave: “*Municipal solid waste*” AND *energy generation*

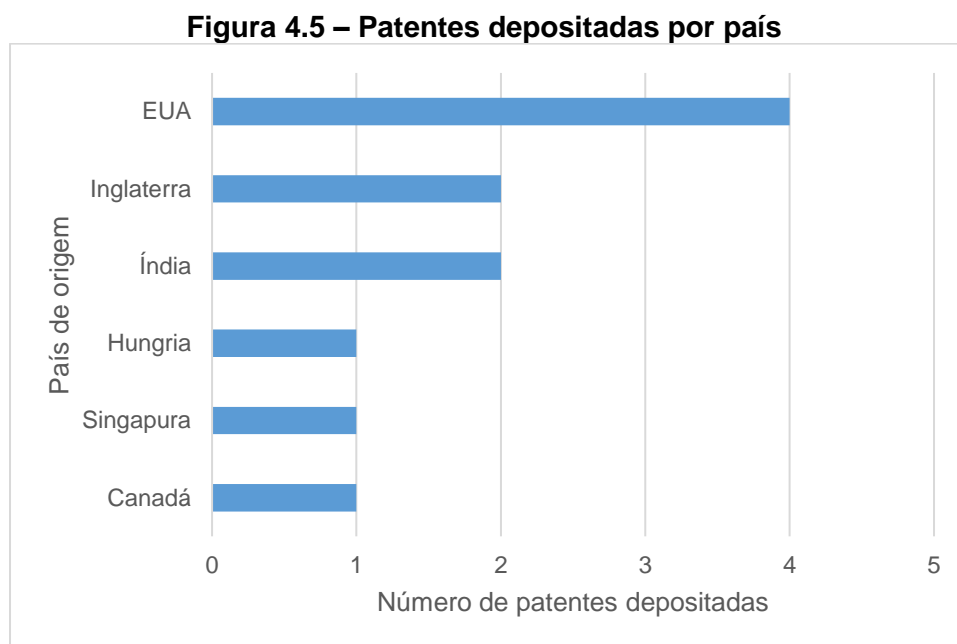
Para a seleção das palavras-chave foi realizada uma tentativa de busca com as mesmas palavras-chave utilizadas para a busca de artigos científicos, porém essa busca não gerou nenhum resultado. A fim de buscar patentes que abordassem a geração de energia a partir de RSU as expressões *waste to energy* e *energy from waste* foram substituídas por *energy generation*, do inglês: geração de energia, sendo a última expressão utilizada sem aspas, pois a busca com aspas não gerou nenhum resultado.

A busca gerou 72 resultados, que passaram por uma análise não somente dos seus resumos, mas também do seu conteúdo, tendo em vista que muitas vezes

o resumo não descrevia claramente se a patente abordava o tópico de interesse deste trabalho. Das patentes analisadas, apenas 11 foram selecionadas como relevantes, apresentados no Anexo B. Patentes que não abordavam nenhum ponto da geração de energia a partir de RSU, ou que não falavam sobre RSU não foram consideradas como relevantes.

4.2.2 Análise Macro

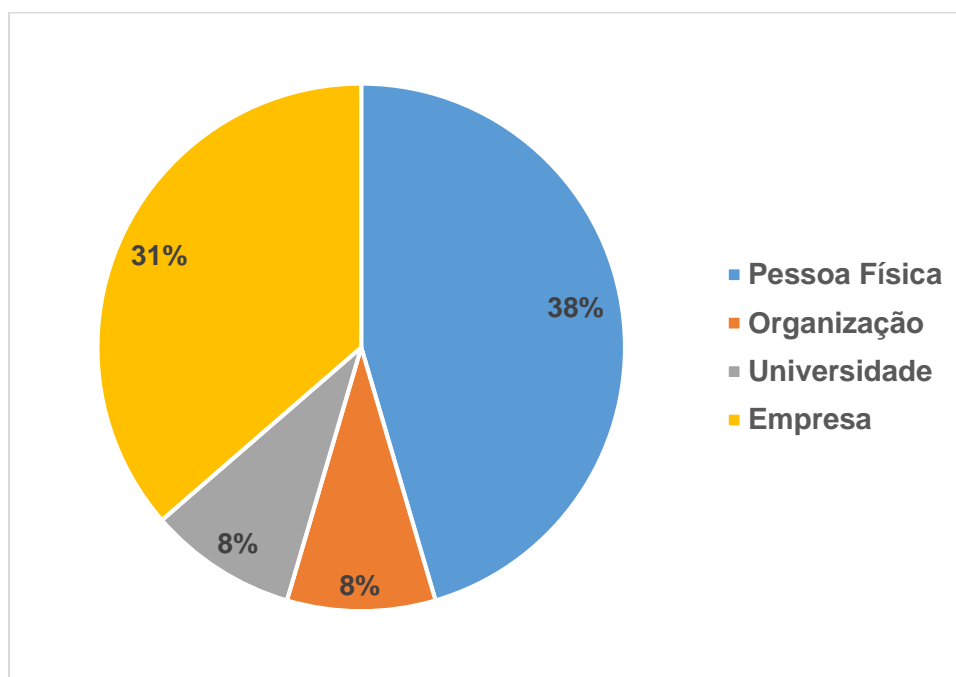
Na análise dos países que publicaram as patentes, representada na Figura 4.5, pode ser observado que os Estados Unidos apresentaram o maior número de publicações, com 4 das 11 patentes depositadas. É possível notar uma participação de países como Singapura, Inglaterra, Índia, Hungria e Canadá.



Fonte: Elaboração própria

Em relação à análise pelo tipo de instituição, apresentada na Figura 4.6, pode ser observado que os que aparecem mais significativamente são pessoas físicas, com 5 patentes depositadas e empresas com 4.

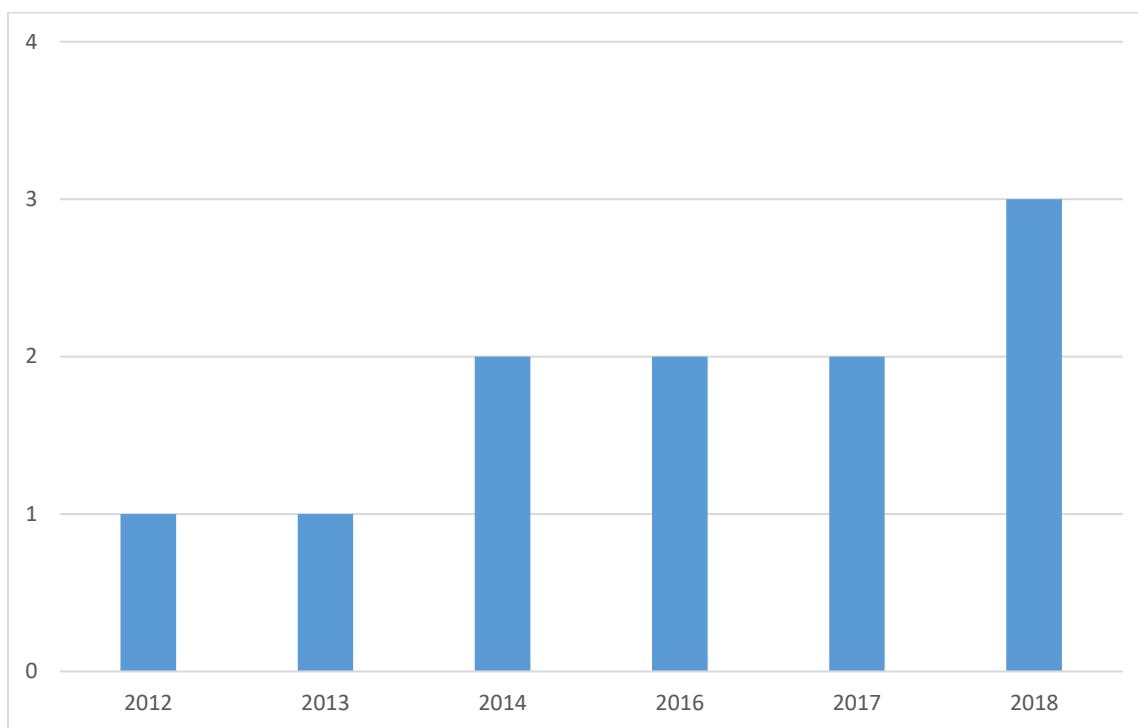
Figura 4.6 – Patentes depositadas por tipo de instituição



Fonte: Elaboração própria

As patentes depositadas possuem uma data de preenchimento da patente e uma data em que recebem o número da aplicação, para a busca foi utilizada a data em que a patente recebeu o número de aplicação e para a análise cronológica, foi considerada a data de preenchimento da patente. No gráfico apresentado na Figura 4.7 pode ser observado que não houve uma discrepância significativa entre os anos. O ano de 2018 foi o com o maior número de publicações, com 3 de 12, em seguida temos os anos 2017, 2016, 2014 com 2 publicações cada.

Figura 4.7 – Patentes depositadas por ano

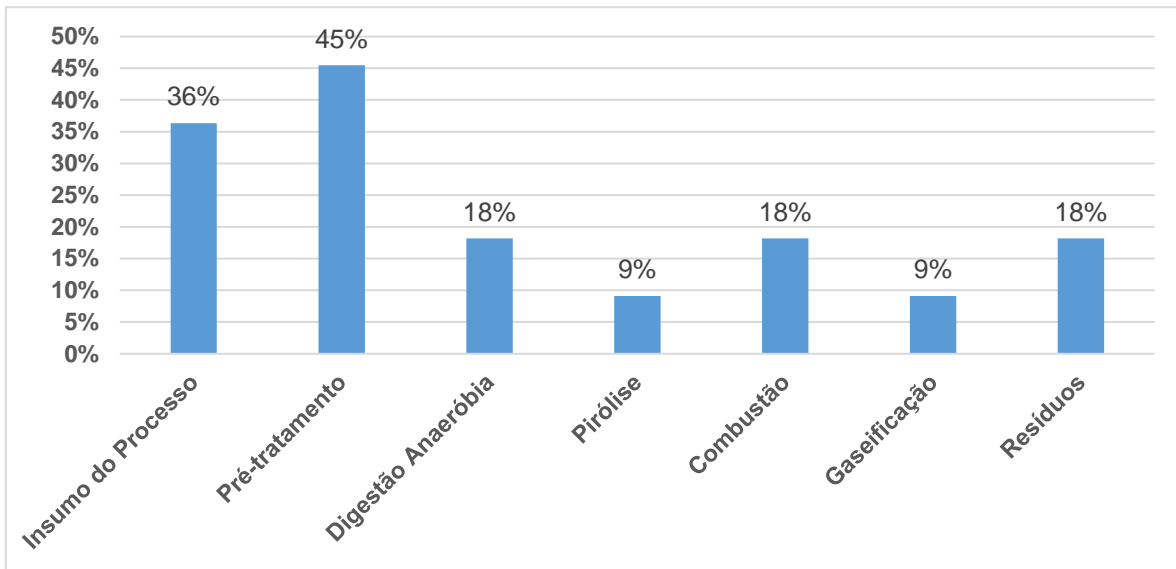


Fonte: Elaboração própria

4.2.3 Análise Meso

A Figura 4.8 apresenta a análise meso das patentes depositadas de acordo com taxonomias relevantes para o trabalho.

Figura 4.8 – Análise meso: Percentual de patentes depositadas em cada taxonomia



Fonte: Elaboração própria

A taxonomia “Pré-tratamento” ganha destaque, com 5 das 11 publicações, em seguida temos “Insumo do Processo” com 4 e “Digestão Anaeróbia”, “Combustão” e “Resíduos”, cada um com duas patentes depositadas. O somatório das porcentagens ultrapassa 100% pois algumas patentes abordam mais de uma taxonomia, então foram contabilizados mais de uma vez.

4.2.4 Análise Micro

Na etapa micro, as taxonomias mais relevantes da etapa meso foram detalhadas na Tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Número de patentes depositadas pela análise micro

| Meso | Micro | Número de patentes depositadas |
|--------------------|------------------------------------|---------------------------------------|
| Insumo do processo | Fração Orgânica | 4 |
| Pré-tratamento | Separação | 2 |
| | Secagem | 1 |
| | Higienização | 1 |
| | Recuperação de compostos orgânicos | 1 |
| | Compactação | 1 |
| | Trituração | 2 |
| Digestão Anaeróbia | Sistema híbrido | 2 |
| | Condições do processo | 1 |
| Pirólise | Condições do processo | 1 |
| | Sistema híbrido | 1 |
| Combustão | Incineração de plasma | 1 |
| Gaseificação | Condições do processo | 1 |
| Resíduos | Reuso de cinzas da combustão | 2 |

Fonte: Elaboração própria

Para a taxonomia “Insumo do Processo”, a fração orgânica foi a única taxonomia abordada nas publicações selecionadas.

Em “Pré-tratamento”, separação e trituração apareceram mais vezes, com 2 patentes cada. Em seguida temos secagem, higienização e recuperação de compostos orgânicos com 1 patente cada.

Em “Digestão Anaeróbia”, os sistemas híbridos dessa taxonomia com outros processos foram abordados em 2 publicações e condições do processo em 1. Os sistemas híbridos citados foram pirólise e uma célula microbiana de combustível.

A taxonomia “Resíduos”, que apareceu em 2 publicações, na análise micro é possível observar que ambas as patentes falam sobre formas de reutilizar as cinzas geradas no processo de combustão.

4.3 Curto Prazo – Patentes Concedidas

4.3.1 Metodologia

Para a análise no que diz respeito a prospecção à curto prazo, foi realizada uma busca em setembro de 2020 na base de dados do governo dos Estados

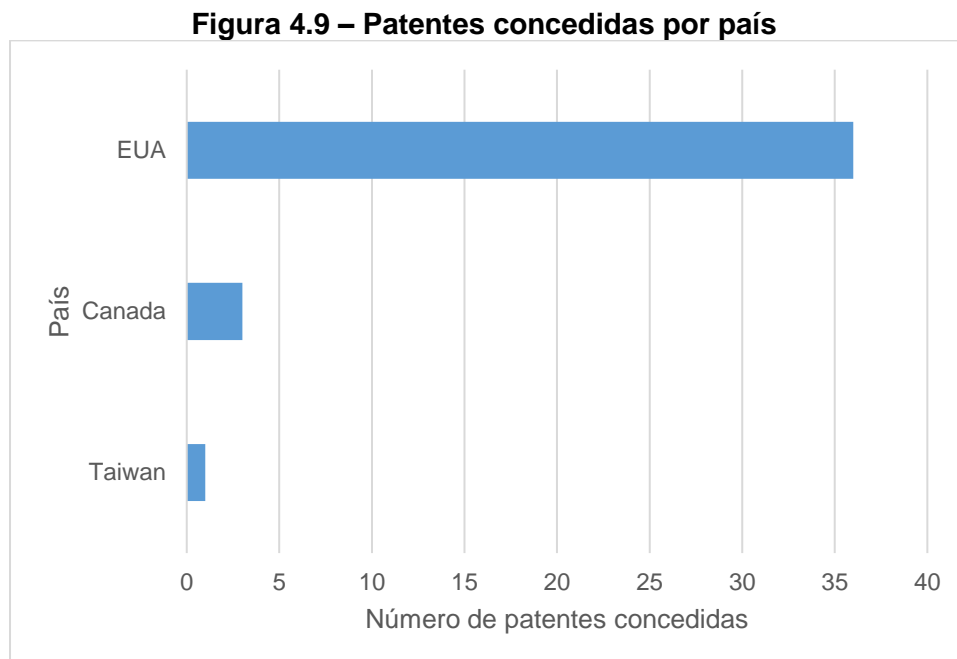
Unidos, *United States Patent and Trademark Office* (USPTO), seguindo os seguintes parâmetros:

- Período analisado: janeiro de 2015 até setembro de 2020
- Palavras-chave: “Municipal solid waste” AND energy generation

A busca resultou em 79 patentes concedidas, seus resumos e conteúdo foram analisados. Do total 40 patentes foram selecionadas por serem relevantes para a pesquisa, apresentados no Anexo C. Os critérios para seleção de patentes relevantes, de palavras-chave e o período analisado foram os mesmos considerados na busca por patentes depositadas.

4.3.2 Análise Macro

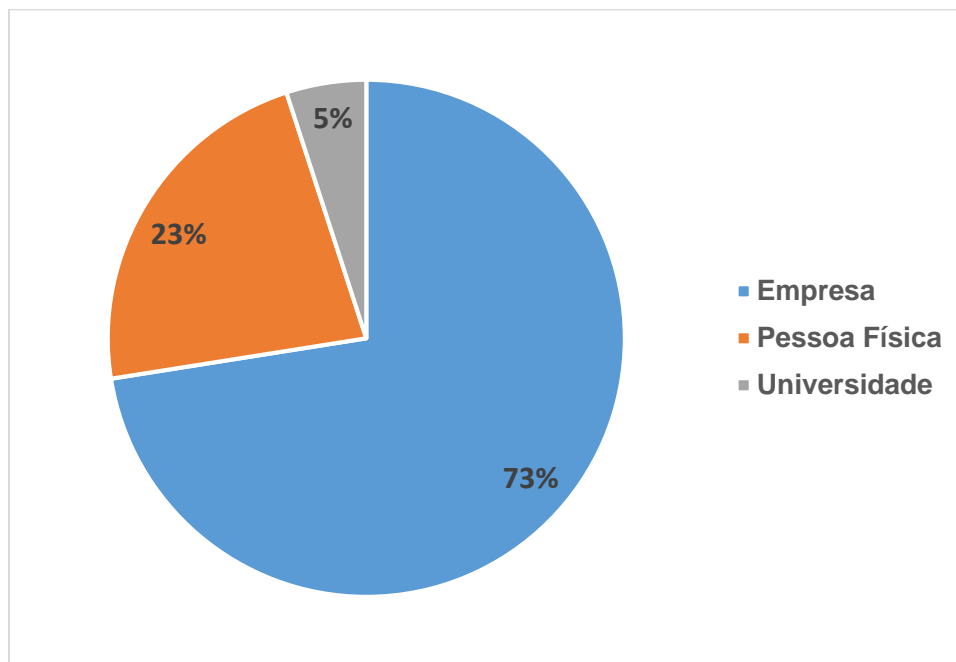
A primeira análise realizada, apresentada na Figura 4.9, levou em conta o país de origem da publicação. A análise mostra que, para o período analisado, a maior parte de publicações é dos Estados Unidos, 36 das 40 patentes concedidas. Depois temos o Canadá com 3 patentes e Taiwan com 1.



Fonte: Elaboração própria

Em relação à análise pelo tipo de instituição, apresentada na Figura 4.10, pode ser observado que a maior parte das patentes concedidas são de empresas, 29 das 40.

Figura 4.10 – Patentes concedidas por tipo de instituição

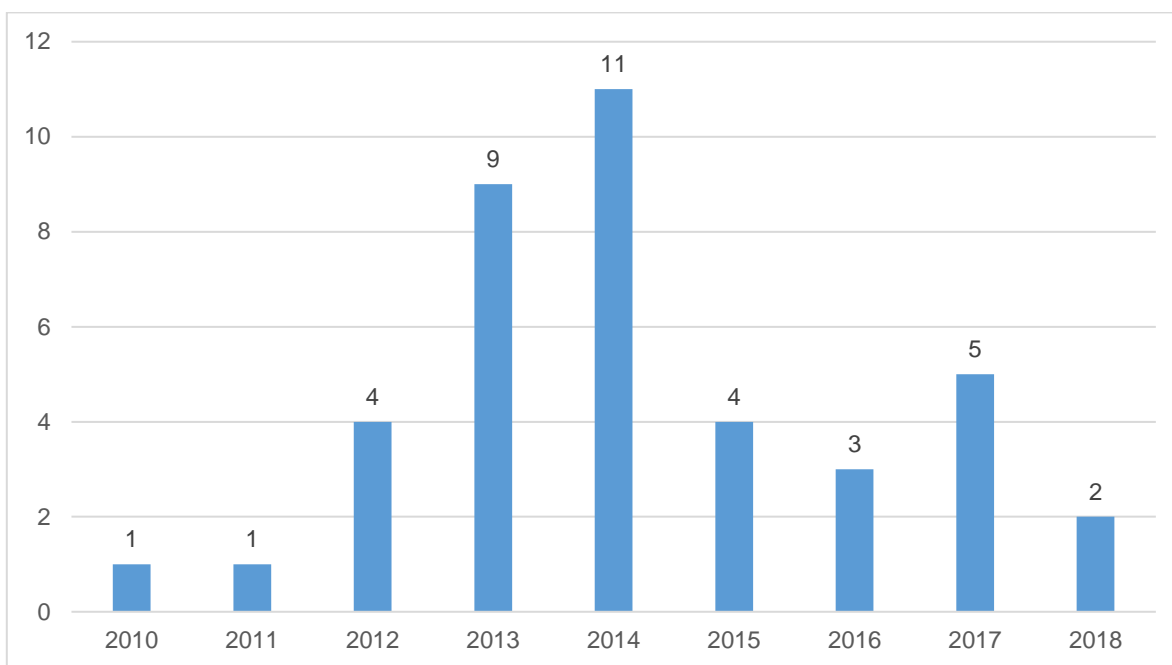


Fonte: Elaboração própria

Para a realização da análise cronológica das patentes concedidas, foi necessária uma análise da data de depósito da patente, tendo em vista que a data de concessão da patente não representa a realidade social inerente ao momento em que o pedido foi depositado. Esta análise pode ser observada na Figura 4.11.

Nota-se que no ano de 2014 houve um aumento expressivo do número de patentes depositadas. Fatores que podem ter influenciado esse aumento são a declaração proferida pela Organizações das Nações Unidas (ONU) de que 2012 seria o ano da energia sustentável para todos (*Year of Sustainable Energy for All*), como forma de atrair a atenção global para a importância da disponibilidade de energia para o desenvolvimento e a redução da pobreza; e a reeleição do presidente dos Estados Unidos Barack Obama, que anunciava políticas de ações em energias renováveis (ENVIRONMENTAL HISTORY TIMELINE, 2012).

Figura 4.11 – Patentes concedidas por ano

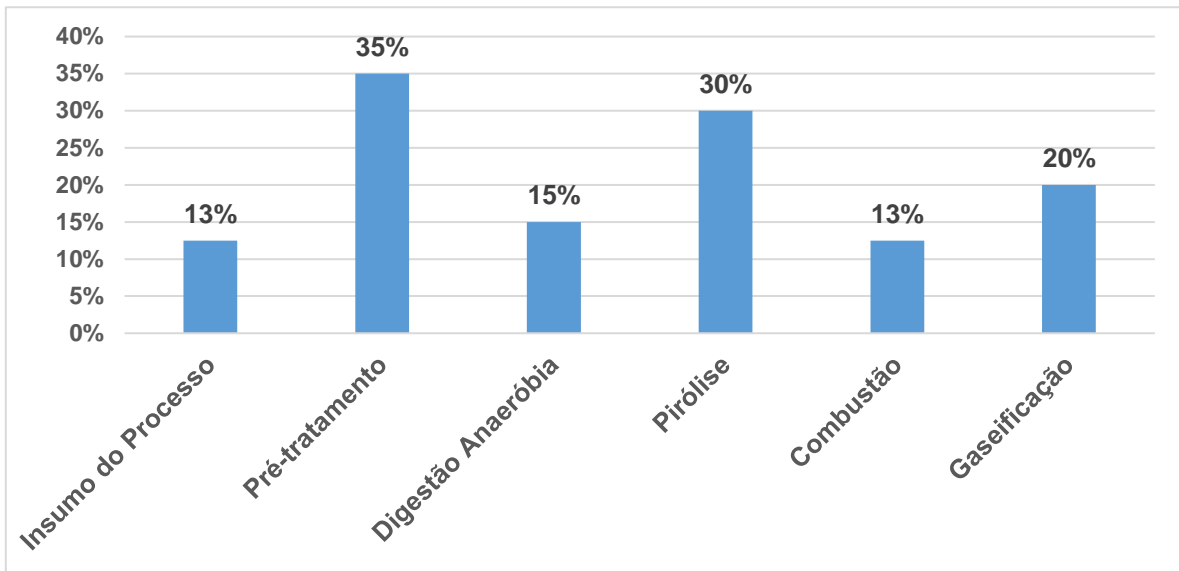


Fonte: Elaboração própria

4.3.3 Análise Meso

A Figura 4.12 apresenta a análise meso das patentes concedidas de acordo com taxonomias relevantes para o trabalho.

Figura 4.12 – Análise meso: Percentual de patentes concedidas de cada taxonomia



Fonte: Elaboração própria

O somatório das porcentagens ultrapassa 100 % pois algumas patentes abordam mais de uma taxonomia, então foram contabilizados mais de uma vez. A taxonomia de “Pré-tratamento” destaca-se como a mais abordada entre as patentes analisadas, estando presente em 14 patentes. “Pirólise” e “Gaseificação” aparecem em segundo maior destaque com, respectivamente, 12 e 8 publicações.

4.3.4 Análise Micro

Na etapa micro, as taxonomias mais relevantes da etapa meso foram detalhadas na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Número de patentes concedidas pela análise micro

| Meso | Micro | Número de patentes concedidas |
|--------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|
| Insumo do Processo | Fração Orgânica | 5 |
| | Carpete | 1 |
| Pré-tratamento | Separação | 14 |
| | Secagem | 2 |
| | Trituração | 2 |
| | Compactação | 1 |
| Digestão Anaeróbia | Digestor | 1 |
| | Armazenamento de energia/biogas | 1 |
| | Sistema híbrido | 3 |
| | Condições do processo | 1 |
| Pirólise | Condições do processo | 2 |
| | Pirólise rápida | 3 |
| | Sistema híbrido | 4 |
| | Hidropirólise | 1 |
| | Produto da pirólise | 1 |
| | Pirólise de plasma | 1 |
| Combustão | Condições do processo | 1 |
| | CHP | 1 |
| | Leito fluidizado | 2 |
| | Combustão de gás rico em hidrogênio | 1 |
| Gaseificação | Gaseificador | 2 |
| | Gaseificação de plasma | 4 |
| | Sistema híbrido | 1 |
| | Purificação do Syngas | 1 |
| | Condições do processo | 1 |

Fonte: Elaboração própria

Em relação á taxonomia “Insumo do Processo”, a fração orgânica do RSU aparece na maioria das patentes analisadas, em todas as publicações. Essa taxonomia, como falado anteriormente, engloba diversos tipos de fração orgânica, como apenas papel, papel e outros componentes, frutas e vegetais.

Para a taxonomia “Digestão Anaeróbia”, os sistemas híbridos apareceram mais vezes, em 3 patentes. Esses sistemas incluem digestão anaeróbia com pirólise e digestão anaeróbia com digestão aeróbia.

Em “Pirólise”, os sistemas híbridos também ganharam destaque, com 4 publicações, que incluem sistemas de pirólise com digestão anaeróbia e com

gaseificação. Em seguida o processo de pirólise rápida aparece com 3 publicações. Condições do processo de pirólise, como diferentes temperaturas, aparece em 2 patentes.

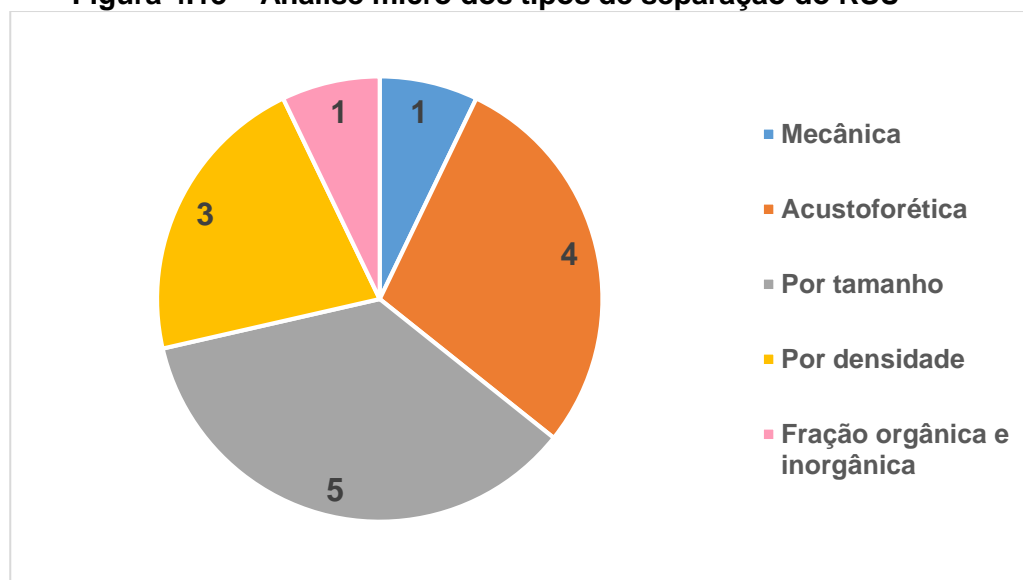
Para “Combustão”, a taxonomia mais relevante foi leito fluidizado, que foi abordado em duas patentes.

A gaseificação de plasma foi a taxonomia mais abordada dentro de “Gaseificação”, ela foi o tópico de 4 das 12 patentes.

Em “Pré-tratamento”, a separação ganha destaque com 14 patentes concedidas. Tendo em vista que muitos tipos de separação do RSU foram encontrados, a Figura 4.13 detalha os tipos de separação que foram abordados nas patentes analisadas.

A separação por tamanho aparece em 5 das 14 patentes concedidas, em seguida a separação acustoforética e a separação por densidade são a segunda e terceira mais abordadas, com 4 e 3 patentes, respectivamente.

Figura 4.13 – Análise micro dos tipos de separação do RSU



Fonte: Elaboração própria

O expressivo número de trabalhos ligados a separação do RSU mostra que esse tópico vem sendo cada vez mais abordado e alerta para a necessidade da

separação na fonte, uma vez que essas separações mencionadas nas patentes já são realizadas em frações do RSU, como fração orgânica, plásticos, entre outros. E demonstram a importância de países como o Brasil, que não apresentam como prática uma forte separação do RSU na fonte, implementarem políticas e campanhas para tal.

4.4 Estágio Atual

4.4.1 Metodologia

Para a análise no que diz respeito a prospecção no estágio atual, ponto zero, do *roadmap* foi realizada uma busca nos sites das empresas que já atuam no setor de geração de energia a partir do RSU. A seleção foi realizada a partir das empresas mais atuantes no mercado internacional de acordo com o Global WtERT Council (2020) e Visiongain (2018).

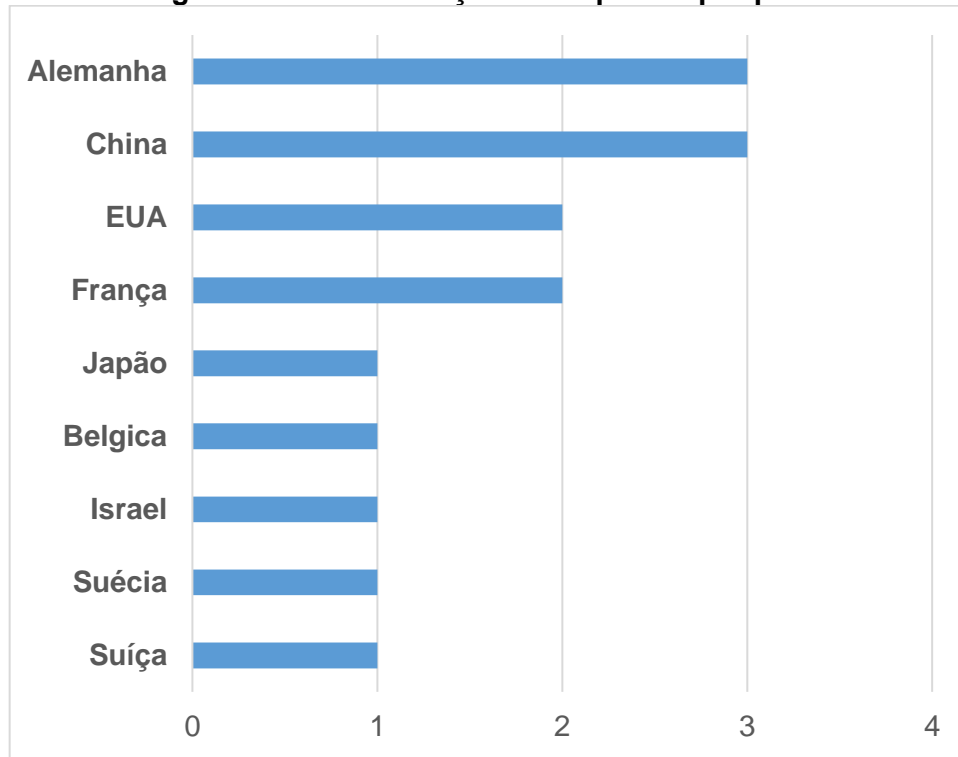
Apesar de no Brasil não existirem empresas nacionais que são atuantes no mercado internacional de geração de energia a partir do RSU, para uma visualização do estágio atual no Brasil foram investigadas empresas que estão em evidência no cenário brasileiro de acordo com a Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos (ABREN).

Essa metodologia resultou em 14 empresas que atuam no mundo e 4 empresas que atuam no Brasil na geração de energia a partir do RSU.

4.4.2 Análise Macro

Para a análise macro, levou-se em conta apenas uma análise dos países mais atuantes no cenário mundial. A Figura 4.14 refere-se aos países de origem das 14 empresas.

Figura 4.14 – Distribuição de empresas por país.



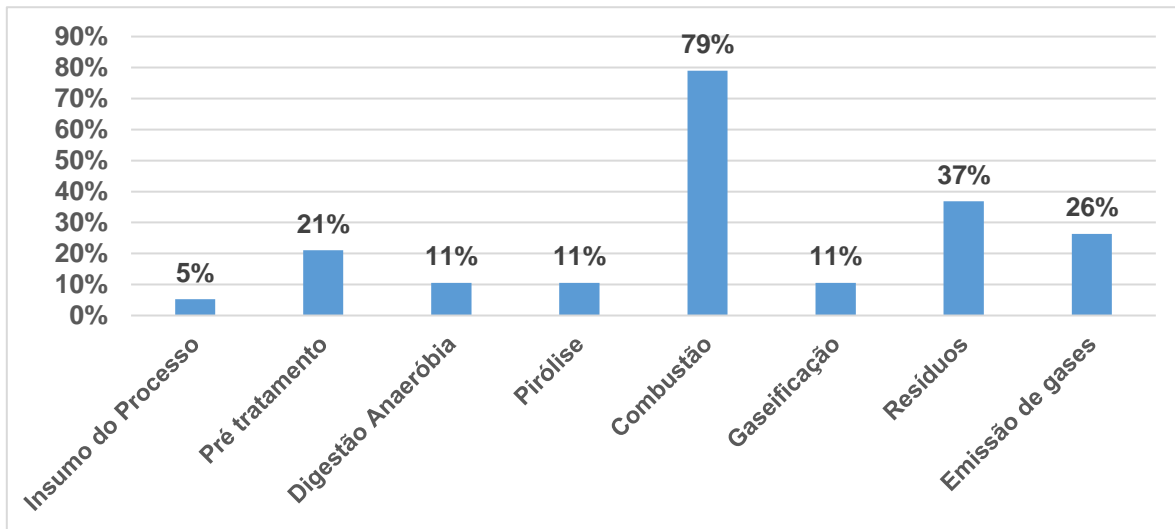
Fonte: Elaboração própria.

Não foram realizadas análises relativas a ano, pois a pesquisa já levou em conta os *players* atuantes no momento, tampouco análises relativas ao tipo de instituição pois só foram selecionadas empresas.

4.4.3 Análise Meso

A Figura 4.15 apresenta a análise meso dos *players* de acordo com taxonomias relevantes para o trabalho.

Figura 4.15 – Análise meso – Estágio atual



Fonte: Elaboração própria.

O somatório das porcentagens ultrapassa 100 % pois algumas empresas atuam em mais de um campo do estudo. A taxonomia “Combustão” destaca-se bastante em relação às outras taxonomias na análise, com 14 das 18 analisados.

4.4.4 Análise Micro

Na etapa micro, as taxonomias mais relevantes da etapa meso foram detalhadas na Tabela 4.1.

Tabela 4.4 – Análise micro – Estágio atual.

| Meso | Micro | |
|--------------------|--|---|
| Insumo do Processo | Fração orgânica | 1 |
| Pré-tratamento | Trituração | 1 |
| | Pré-secagem | 1 |
| | Separação mecânica | 2 |
| Digestão Anaeróbia | Digestor | 1 |
| Pirólise | Flash Pirólise | 1 |
| Combustão | Turbinas de condensação | 5 |
| | Grelhas móveis | 1 |
| | CHP | 6 |
| | Leito fluidizado | 1 |
| | Combined cold and power | 1 |
| Gaseificação | Fluxo de arraste | 1 |
| Resíduos | Remoção/Recuperação de metais das cinzas | 4 |
| | Tratamento de cinzas | 1 |
| | Reuso das cinzas | 1 |
| Emissão de gases | Tratamento | |
| | Carvão ativado | 3 |
| | Filtro manga | 3 |
| | Filtro de tecido | 1 |
| | Bicarbonato de sódio | 1 |
| | Cal hidratada | 1 |

Fonte: Elaboração própria.

O número total da análise micro ultrapassa o número de empresas analisadas pois algumas atuam em mais de uma taxonomia meso ou mais de uma taxonomia micro.

Os números mais expressivos encontram-se na taxonomia meso “Combustão”, e são eles CHP com 6 empresas atuando nesse segmento e a produção somente de energia, por meio de turbinas de condensação, com 5.

Para a taxonomia “Resíduos”, pode ser observado que a maior parte das empresas trabalha com a recuperação de metais das cinzas do processo de combustão.

Na taxonomia de “Emissão de Gases”, todas as empresas pesquisadas atuam no tratamento dos gases emitidos no processo de geração de energia a partir do RSU, e os métodos mais utilizados são carvão ativado e filtro manga.

5. Etapa Pós-prospectiva – Elaboração do Roadmap

Dando continuidade a metodologia abordada neste trabalho, na fase pós-prospectiva o *roadmap* tecnológico é montado utilizando as informações obtidas nos artigos, patentes e mídia digital de empresas. O foco dessa etapa é reorganizar as informações da etapa de prospecção tecnológica, exibindo-as em um mapa dividido nos eixos de tempo (horizontal) e taxonomias (vertical).

Os *players*, todas as instituições, empresas, universidades, encontrados na etapa prospectiva são representados por suas respectivas logomarcas e dispostos ao longo do eixo temporal de forma a melhor preencher o mapa. Ao longo desse eixo, o mapa foi dividido nas seções abordadas anteriormente: Estágio Atual, Curto Prazo, Médio Prazo e Longo Prazo. Foi utilizado um *cluster* denominado “Parceria” para indicar os *players* que trabalharam juntos. Para uma melhor visualização no mapa, atores que abordam as mesmas taxonomias foram agrupados em um *cluster* denominado de “Mesmo Foco”.

Na coluna à esquerda do *roadmap* encontram-se as taxonomias apresentadas nas etapas meso e micro da etapa prospectiva, na qual algumas taxonomias micro que se relacionavam foram agrupadas para uma melhor visualização no mapa. Delas saem linhas horizontais que percorrem toda a extensão do mapa. De cada *player* ou *cluster* saem setas verticais, que indicam a taxonomia na qual aquele *player* trabalhou ou trabalha indo de encontro à linha horizontal de cada taxonomia.

Como o *roadmap* inteiro, elaborado via excel, apresentado na Figura 5.1, é muito extenso, ele será mostrado em cortes verticais das seções abordadas na etapa prospectiva.

Figura 5.1 – Technology Roadmap Completo.



Fonte: Elaboração própria.

5.1 Estágio Atual

Na Figura 5.2, pode-se visualizar o recorte temporal do estágio atual para o *roadmap*. São apresentados os *players* identificados através da mídia especializada.

No Brasil, apesar de ainda não possuímos plantas que tratem os resíduos sólidos urbanos de municípios e estados, algumas empresas menores investem em tecnologia para a implementação em menor escala de tratamento do RSU. A ZEG Ambiental e a WEG são empresas que vendem plantas de pequeno porte para outras empresas, pessoas físicas ou instituições, sendo uma com trituração como pré-tratamento e *flash* pirólise como tecnologia principal e a outra apostando em secagem do RSU como pré-tratamento e em gaseificação com fluxo de arraste como etapa principal.

Apesar de não ser brasileira, a empresa israelense Homebiogás atua no mercado nacional com a venda de digestores de pequeno porte, que realizam a conversão do RSU em energia por via úmida a partir da fração orgânica do RSU, como restos de comida. A iniciativa de pequeno porte, vende equipamento para casas, hotéis, escolas, hospitais - levando a tecnologia de geração de energia a partir do RSU para as pessoas.

Ainda no Brasil, a Orizon Valorização de Resíduos, antiga Foxx Participações, em parceria com a Prefeitura de Barueri tem previsto para o primeiro semestre de 2021 o início da construção da primeira unidade de recuperação energética no Brasil. Por meio da combustão, a empresa pretende gerar apenas energia a partir dos resíduos gerados pelo município de Barueri que não forem para a coleta seletiva, que já cobre 100 % das residências de Barueri. A empresa pretende também reutilizar os resíduos da combustão na construção civil, utilizando-os para pavimentação (MELO, 2020).

Nos Estados Unidos, as empresas Covanta e Wheelabrator Technologies formam um *cluster* de mesmo foco. Ambas detêm diversas plantas de incineração espalhadas pelo país que contam com sistema de separação mecânica do RSU e

realizam a combustão com turbinas de condensação, ou seja, geram apenas energia em suas plantas. Além disso, contam com tecnologia para realizar a remoção de metais das cinzas e o tratamento dos gases gerados no processo.

A multinacional belga Keppel Seghers fornece equipamentos para plantas do mundo todo. Investe em tecnologia para câmaras de combustão, como a Sigmatrix, uma combinação de alta performance de um sistema de controle da câmara de combustão e grelhas, e em tecnologia para remoção de metais das cinzas da incineração, assim como em tecnologia para o tratamento dos gases, com equipamentos para a lavagem dos gases a seco e semi-seco.

Na Suécia, a Umea Energi, possui plantas de geração CHP e aposta em tecnologias de câmaras de combustão com leito fluidizado.

As empresas Veolia e EDF, da França e EEW Energy from waste e WTE EVN Group, da Alemanha, formam um *cluster* de mesmo foco pois todas investem em tecnologia para a geração CHP a partir do RSU.

A multinacional japonesa Mitsubishi investe em equipamentos para a geração de energia a partir de resíduos. Desde fornos completos para a combustão, gaseificadores, sistemas para queima das cinzas da gaseificação até sistemas avançados para o tratamento de gases.

Na China, a empresa Everbright Environment possui cerca de 133 projetos de plantas *waste-to-energy*, parte em operação e parte em fase de construção, utilizando a incineração para a produção somente de energia e com tratamento dos gases emitidos pela planta.

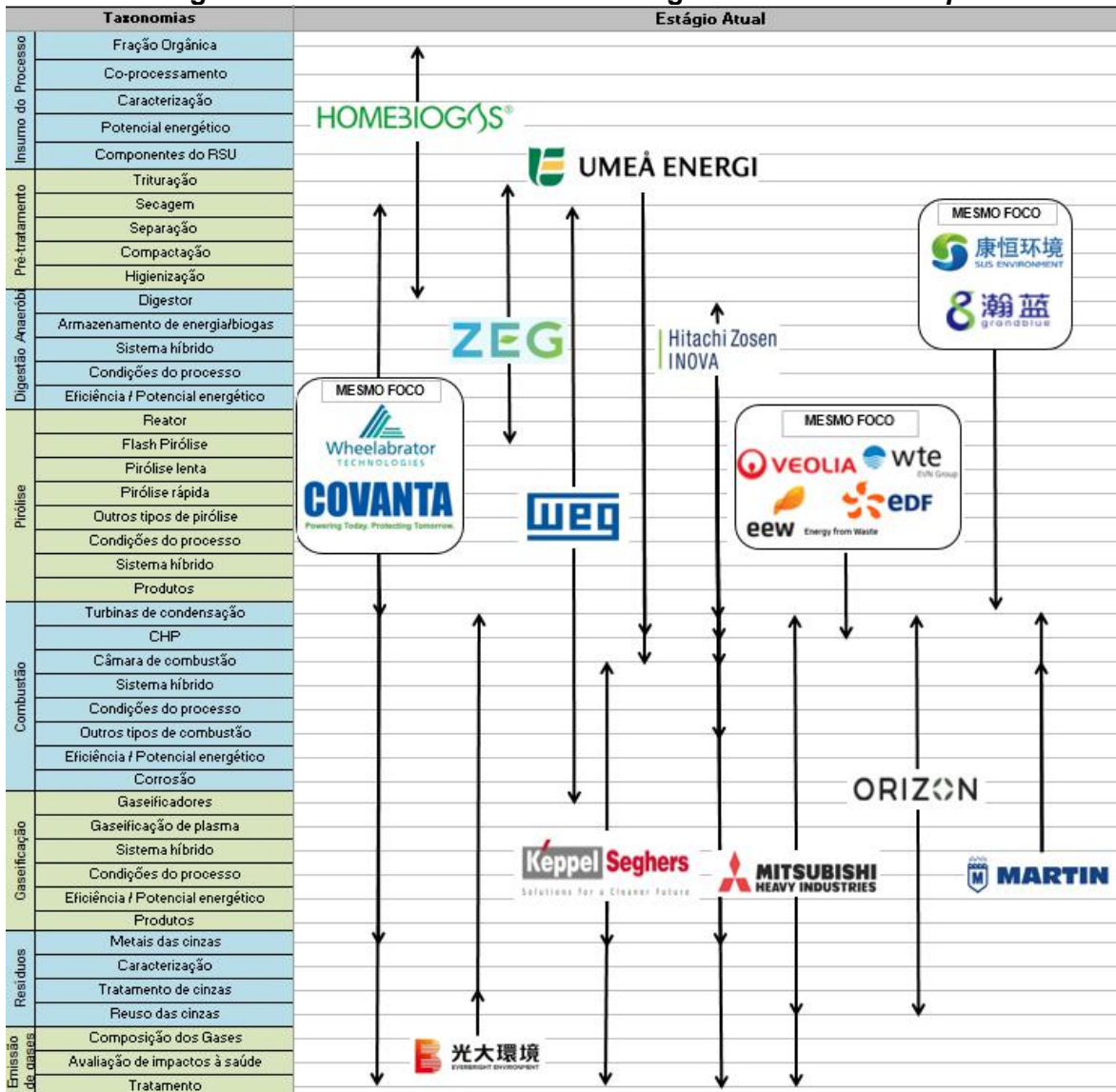
Outra multinacional de grande importância para o mercado atual de geração de energia através do RSU é a Hitach Zosen INOVA, da Suíça, que implementa plantas no mundo inteiro. Ela conta com vários equipamentos para câmaras de combustão, que incluem sistema de combustão em grelhas, combustão em leito fluidizado e até um equipamento para limpeza de caldeiras. Suas plantas também contam com o sistema InovaRe, de recuperação de metais das cinzas do resíduo do processo. A empresa também possui equipamentos para tratamento das cinzas

e dos gases do processo. As plantas da multinacional sueca podem ser apenas de geração de energia ou de geração combinada de calor e energia.

A multinacional Martin, é alemã e, além de construir plantas de incineração de resíduos para geração somente de energia, possui serviços direcionados para manutenção de plantas, com serviços especializados em caldeiras e serviços de consultoria de engenharia para a planta, além do fornecimento de peças.

Por último, temos mais um *cluster* de mesmo foco, com a empresas chinesas SUS Environment, que conta com alguns parques, bases de tratamento de RSU, pelo país e a Grand Blue, empresa que também constrói diversos parques de tratamento de resíduos pelo país, com serviços integrados desde a coleta dos resíduos até a sua incineração para a geração de energia.

Figura 5.2 – Recorte referente ao Estágio Atual do Roadmap.



Fonte: Elaboração própria.

5.2 Curto Prazo

Na Figura 5.3, pode-se visualizar o recorte temporal a curto prazo para o roadmap. São apresentados os *players* que detêm tecnologia em forma de patentes concedidas que englobam tecnologias pertencentes ao escopo do estudo.

É possível identificar as taxonomias mais abordadas por meio da densidade de setas presente em cada conjunto de linhas horizontais. As taxonomias meso

onde a maioria das setas se encontram são “Pré-tratamento” e “Pirólise” respectivamente.

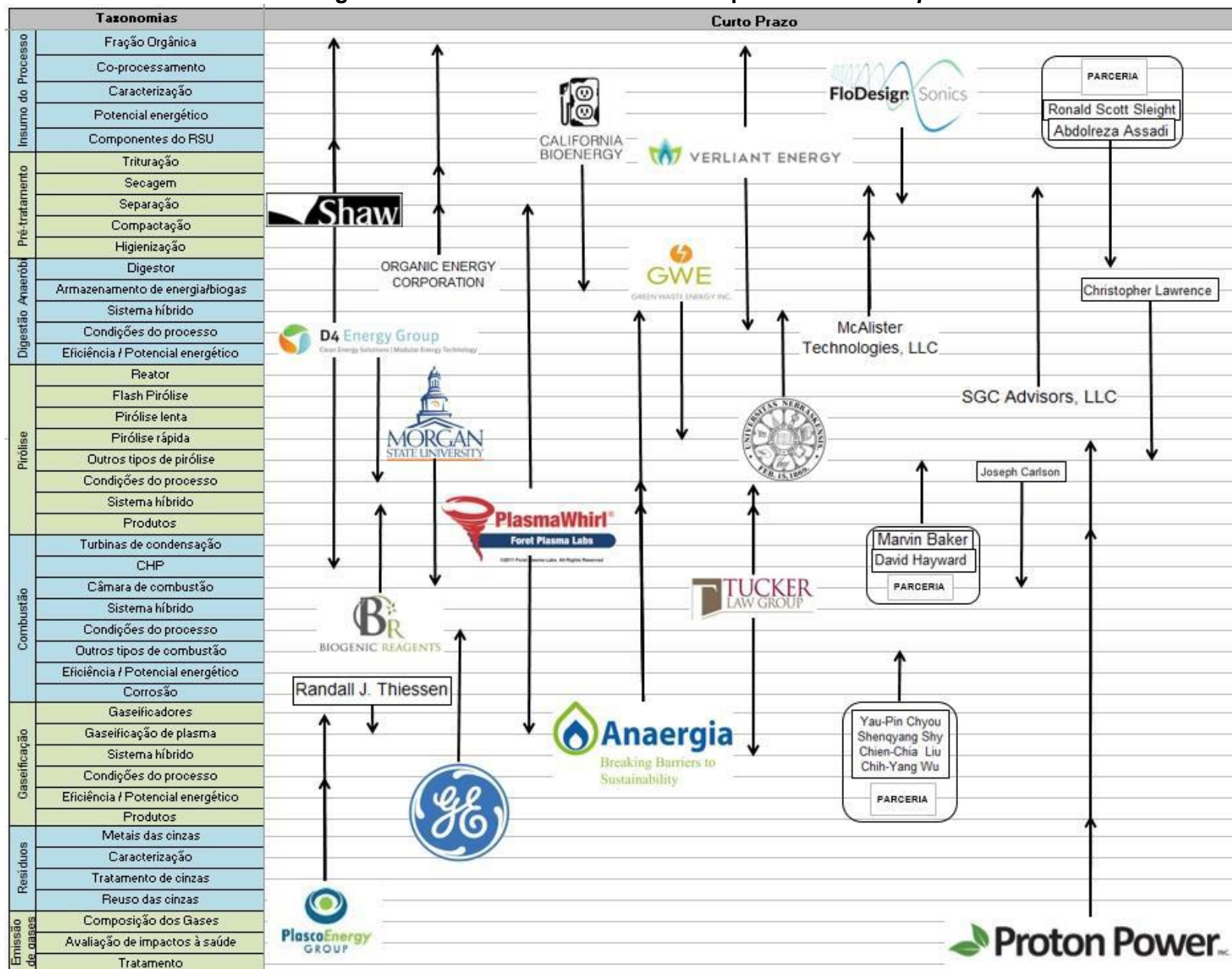
A empresa Organic Energy Corporation destaca-se com 6 patentes voltadas para separação, tecnologia de pré-tratamento do RSU e algumas delas abordando especificamente a fração orgânica do RSU. Dentre os tipos de separação que a empresa possui tecnologia, alguns deles são: separação mecânica, separação por tamanho e por densidade. Também possuem uma patente que engloba trituração e a separação por tamanho.

A Foret Plasma Labs, LLC é responsável por 4 patentes relacionadas à gaseificação de plasma e uma patente em pré-tratamento que combina sinergicamente plasma com um meio de trituração, como moinho.

Ainda na taxonomia de pré tratamento, a empresa FloDesign Sonics, Inc. também é um destaque. Com 4 patentes, todas voltadas para a separação do RSU, a empresa foca na separação acustoforética do RSU.

A Anaergia Inc. aborda muitas taxonomias em um mesmo documento, possui uma patente que combina um digestor anaeróbio com um reator de pirólise para tratar RSU ou lodo de estações de tratamento de água e ainda aborda a utilização do carvão vegetal, produto da pirólise, como um adubo para o solo.

Figura 5.3 – Recorte referente ao Curto prazo do Roadmap.



Fonte: Elaboração Própria.

5.3 Médio Prazo

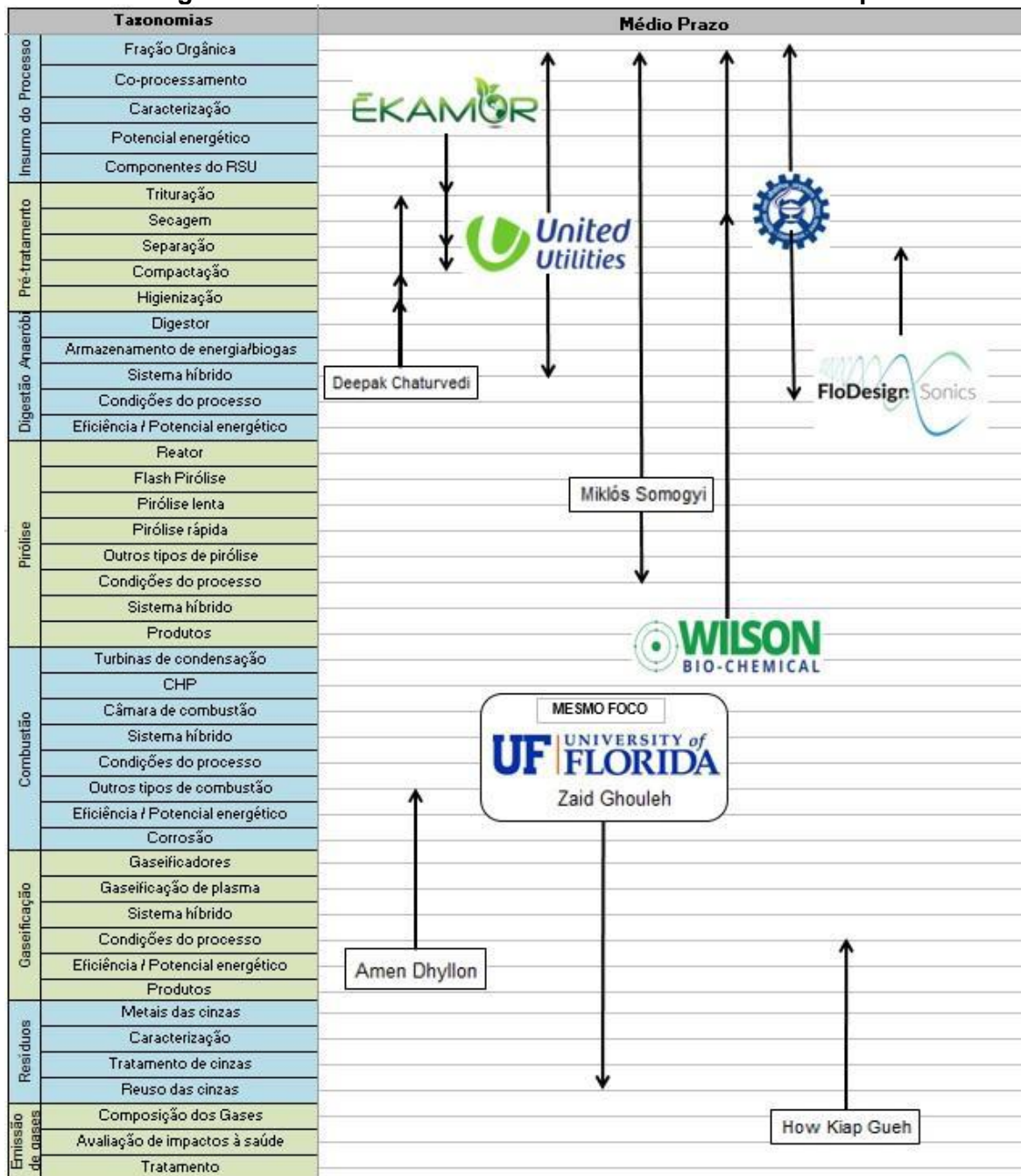
Na Figura 5.4, pode-se visualizar o recorte temporal a médio prazo para o *roadmap*. São apresentados os *players* que detêm tecnologia em forma de patentes depositadas que englobam tecnologias pertencentes ao escopo do estudo.

As taxonomias mais abordadas são “Pré-tratamento” e “Insumo do Processo”, respectivamente. Dentro de “Pré-tratamento”, as patentes solicitadas dividem-se nas taxonomias micro: trituração, secagem, separação, compactação e higienização.

Pode-se observar, que dentro da taxonomia “Insumo do Processo”, todos os trabalhos são focados na fração orgânica do RSU, com patentes depositadas pelas empresas United Utilities PLC, Wilson Bio-Chemical Limited, pela pessoa física Miklós Somogyi e pelo Conselho de Pesquisa Científica e Industrial da Índia (CSIR). Apesar destes *players* possuírem patentes que falam sobre a fração orgânica do RSU, eles não estão agrupados em um *cluster* de mesmo foco pois cada um possui uma patente que relaciona a fração orgânica com outra taxonomia.

A Universidade da Flórida e o pesquisador Zaid Ghoulah constituem um *cluster* de mesmo foco pois ambos possuem patentes solicitadas que detêm tecnologia para a reutilização das cinzas da combustão.

Figura 5.4 – Recorte referente ao Médio Prazo do Roadmap.



Fonte: Elaboração própria.

5.4 Longo Prazo

Devido ao grande número de artigos encontrados no período analisado, foram feitos recortes dentro do próprio recorte temporal a longo prazo, para melhor visualização do *roadmap*. Nas Figuras 5.5, 5.6, 5.7 e 5.8, pode-se visualizar os recortes temporais a longo prazo para o *roadmap*. São

apresentados os *players* que detêm tecnologia em forma de artigos que englobam tecnologias pertencentes ao escopo do estudo.

As taxonomias meso que apresentam maior densidade de setas em seu conjunto de linhas horizontais são “Combustão” e em seguida “Insumo do Processo” e “Gaseificação”.

Como mencionado, têm-se uma melhor visualização da grande participação de universidades dentre os *players* deste recorte. Pode-se observar pelo mapa que neste recorte o número de *clusters* de parceria e de mesmo foco é bem grande.

O Indian Institute of Technology Delhi (IIT) é o *player* que aparece com mais publicações. Em parceria com o a North Delhi Municipal Corporation, publicaram 3 artigos que se enquadram na taxonomia micro “Potencial energético”, com estudos sobre uma forma de calcular a incinerabilidade do RSU. Também realizou parceria com a universidade de Teri em uma publicação sobre separação mecânica do RSU. E, sozinho, publicou um artigo sobre reuso das cinzas de incineração. Com essa última publicação, o IIT faz parte de um grande *cluster* de mesmo foco desta taxonomia, que conta com *players* como a Universidade de Barcelona, Instituto Politécnico de Hong Kong, assim como três parcerias: uma entre a universidade de Pompeu Fabra, em Barcelona e a Universidade de Cantabria, outra entre KU Leuven, uma universidade Belga e a VVSG, uma empresa Belga e mais uma entre a empresa Livolt e a The City University of New York, a universidade pública da cidade de Nova Iorque.

A universidade belga KU Leuven, também faz parte de outros dois grandes *clusters* de mesmo foco: um sobre CHP, onde possui um artigo em parceria com a empresa Keppel Seghers, e outro sobre “produtos da gaseificação”, com uma publicação em parceria com a universidade sueca KTH Royal Institute of Technology e com a empresa belga Energyville sobre a remoção de um constituinte indesejado do gás de síntese, o alcatrão.

A universidade tecnológica de Nanyang, em Singapura, também é um *player* atuante no mapa, com 5 artigos publicados. Dois voltados para a taxonomia meso “Resíduos”, sendo um em parceria com a Universidade de Sydney, focado no reúso das cinzas e outro em parceria com a Universidade de Sichuan, a Universidade de Hong Kong e a empresa Zerowaste Asia Co. Ltd, que tem como foco o tratamento das cinzas, taxonomia essa que possui um *cluster* de mesmo foco formado, além da parceria citada, pela Universidade de Calabria, e uma parceria entre a Universidade Estadual de Louisiana e pela University College London. Os outros 3 artigos são em parceria com a Universiti Sains Malaysia e a Technical University of Crete (TUC), e abordam diferentes condições do processo de gaseificação relacionados à gaseificadores de leito fixo, assim como a purificação ou retirada de compostos do gás de síntese, produto da gaseificação.

A parceria entre a Universidade de Tianjin e a Universidade do Tibet gerou 4 artigos publicados. Um que descreve os efeitos da combustão enriquecida com oxigênio na emissão de diferentes gases que impactam a saúde. E outros 3 artigos que abordam a taxonomia micro corrosão, sendo um deles em parceria com a Universidade Técnica da Dinamarca.

No Brasil, a Universidade Estadual Paulista (UNESP) possui um estudo sobre o cálculo da taxa de carbono aplicada a sistemas híbridos de geração de energia a partir do RSU, com turbinas de gás natural e um incinerador CHP, calculando também a eficiência do processo. A Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) aparece no mapa com um estudo teórico sobre a influência do nível de conteúdos sólidos secos presentes na fração orgânica do RSU para o abastecimento de plantas de gaseificação com turbinas a gás.

A parceria entre as universidades brasileiras Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri (UFVJM) e a Universidade Federal do ABC (UFABC) faz parte do *cluster* de mesmo foco conjuntamente com a University of Malaya, a King Khalid University e a National University of Sciences and

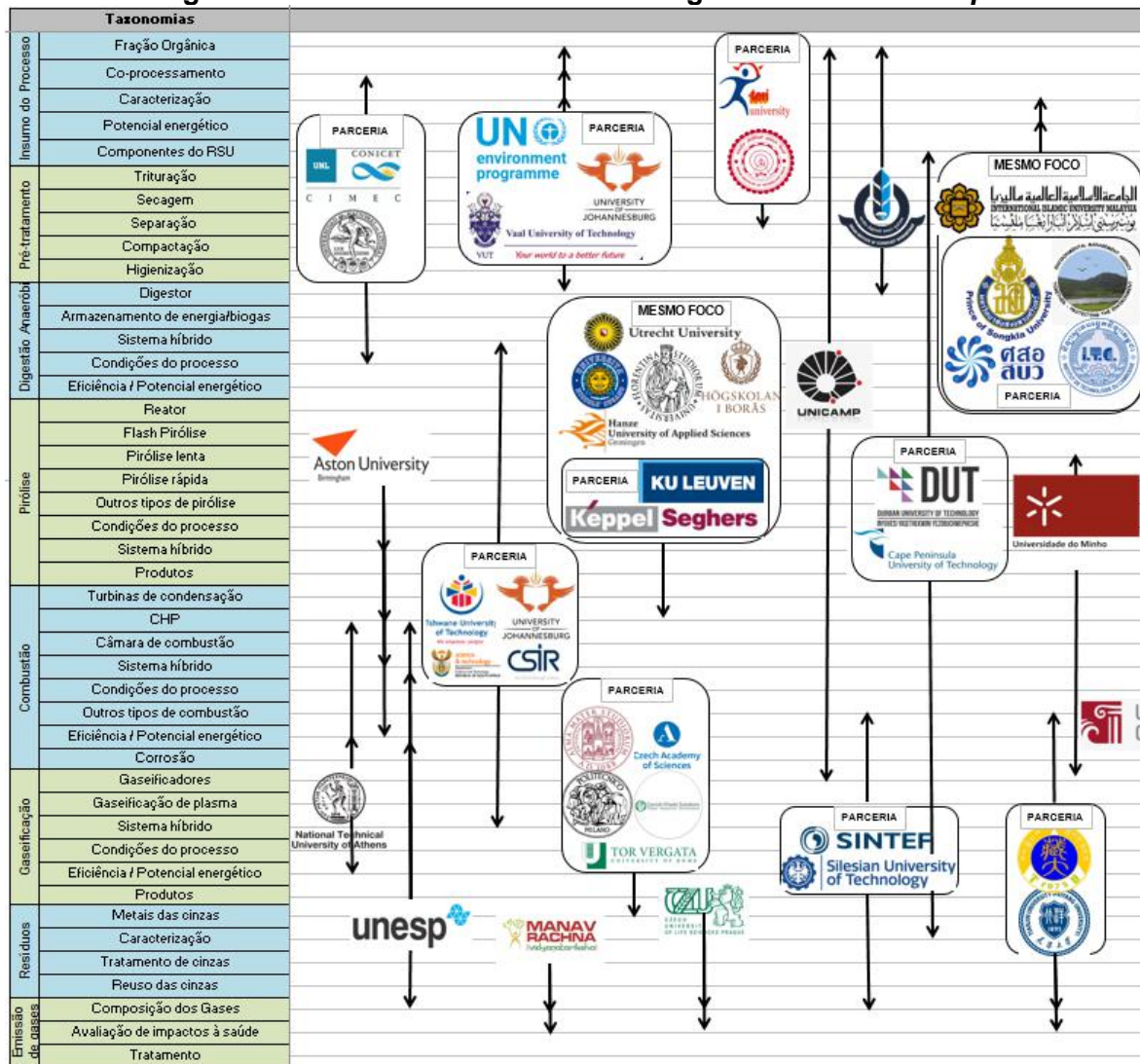
Technology, Islamabad (NUST), que abordam artigos que falam sobre cálculo de potencial energético do RSU e da combustão deste para geração de energia.

A PUC Rio aparece com um artigo sobre o cálculo de potencial energético com abordagem econômica de plantas híbridas de combustão com turbinas a gás natural.

Ainda no Brasil, a parceria entre Universidade Federal do Paraná (UFPR), a Florida State University, e o Instituto Politécnico Nacional (IPN) do México, gerou um artigo sobre um sistema híbrido de CHP com integração com um sistema de cultivo de microalgas.

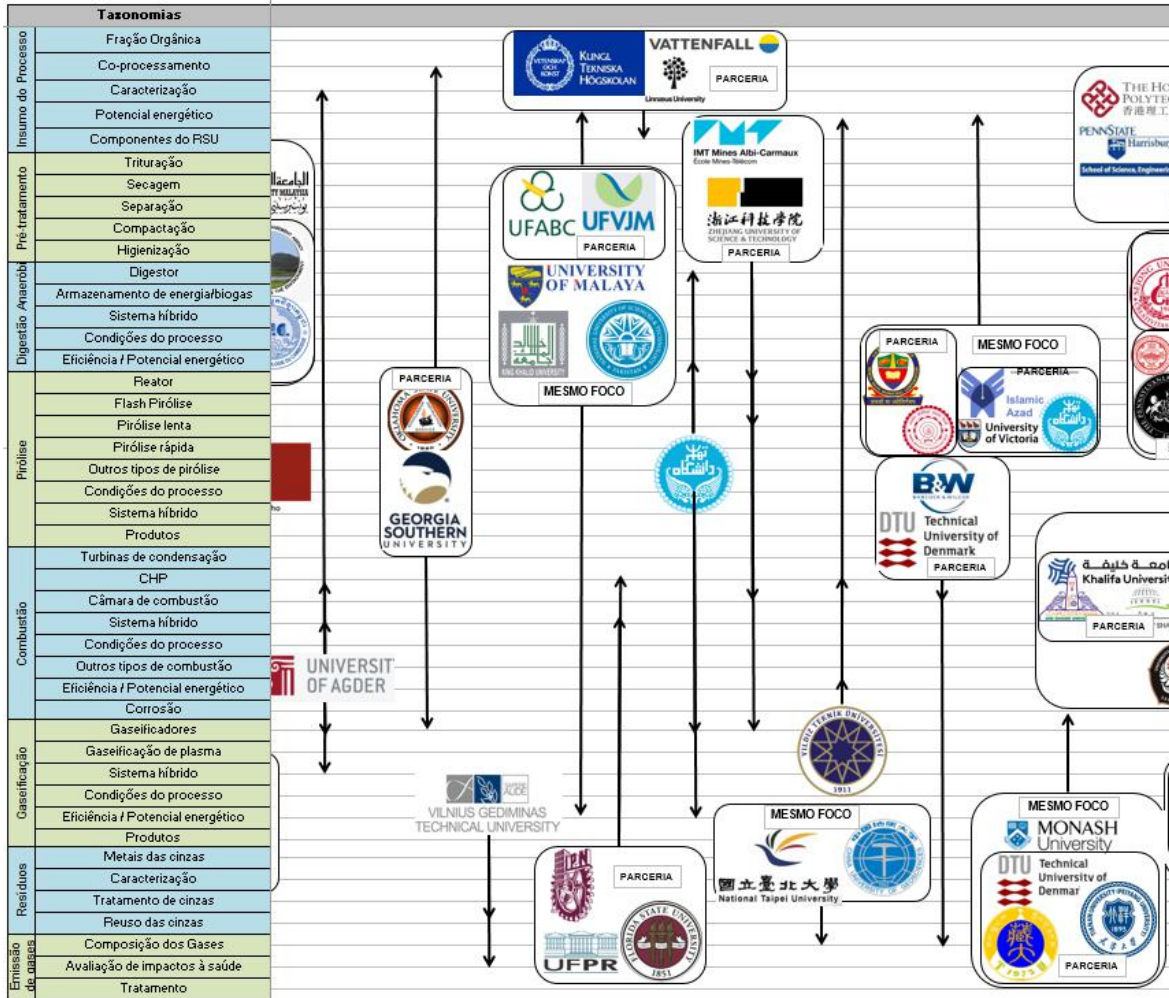
Nota-se que, mesmo o Brasil apresentando 5 artigos científicos, ainda é um número baixo comparado com o total de 111, e dos 5 artigos encontrados, 3 contam com a participação de universidades paulistas.

Figura 5.5 – Recorte 1 referente ao Longo Prazo do Roadmap.



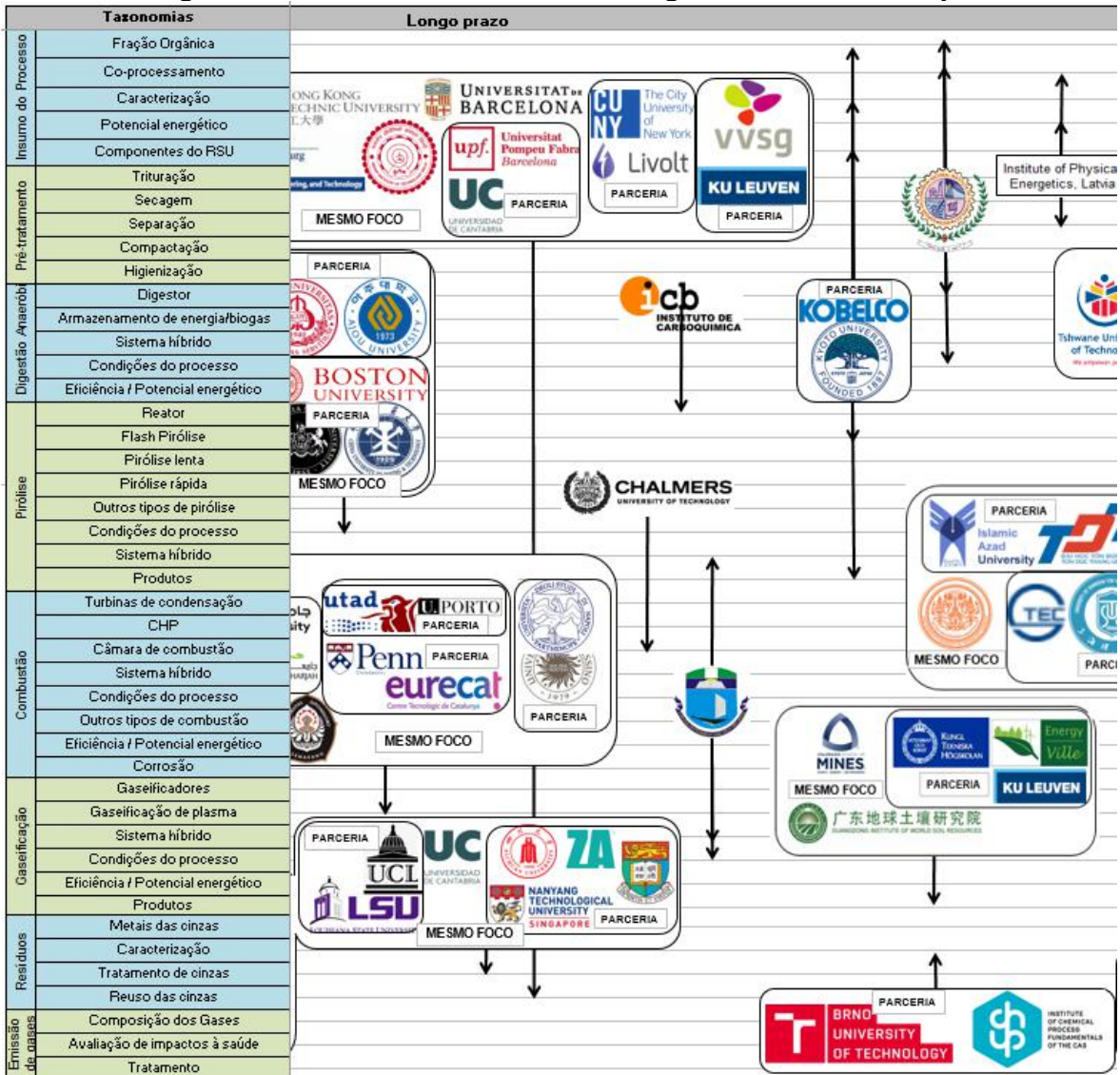
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 5.6 – Recorte 2 referente ao Longo Prazo do Roadmap.



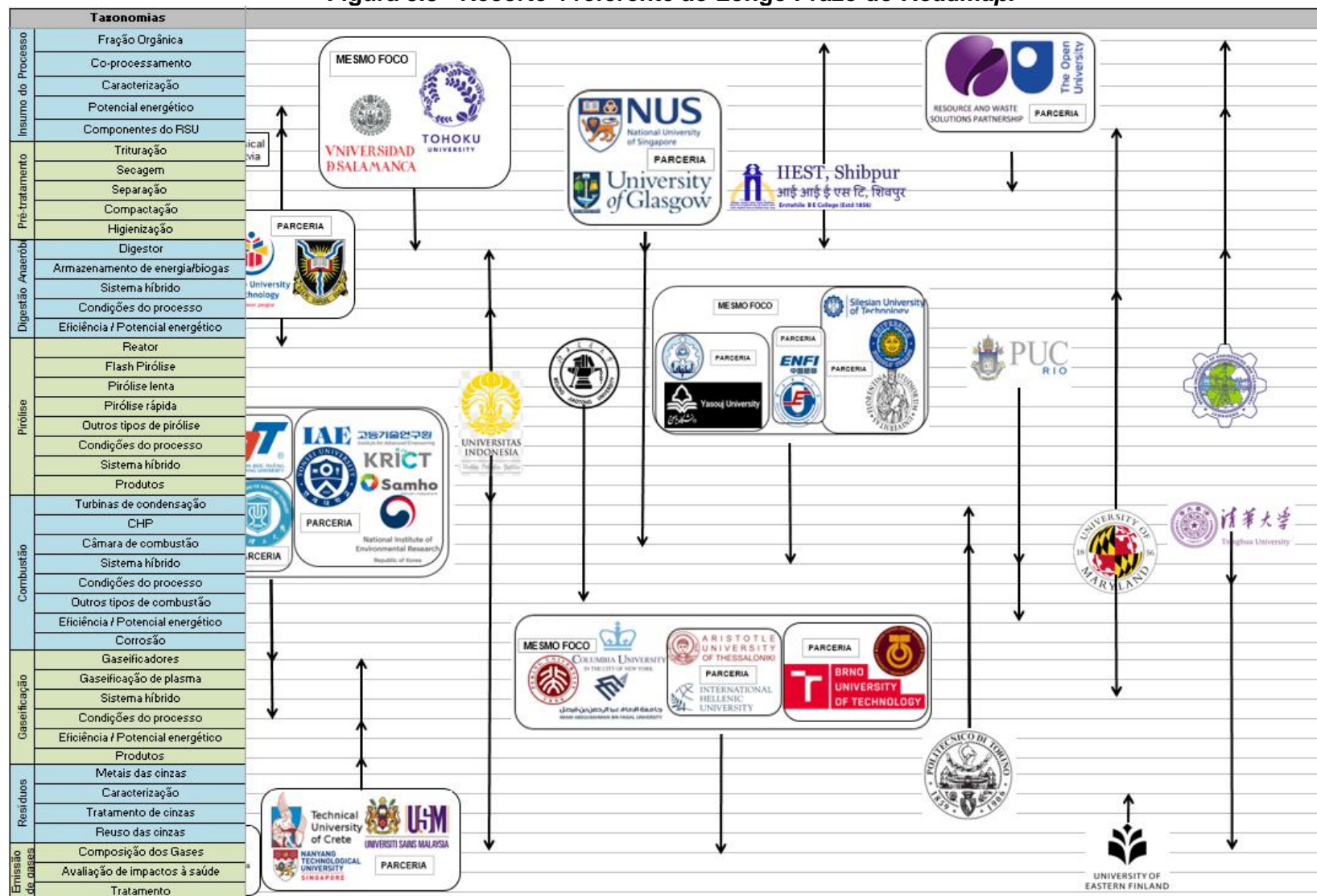
Fonte: Elaboração Própria.

Figura 5.7 - Recorte 3 referente ao Longo Prazo do Roadmap.



Fonte: Elaboração Própria.

Figura 5.8 - Recorte 4 referente ao Longo Prazo do Roadmap.



Fonte: Elaboração Própria.

6. Conclusão

A partir da análise do *roadmap* tecnológico é possível visualizar algumas tendências no mercado mundial de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos.

No estágio atual, observa-se um grande número de multinacionais que atuam em diversas taxonomias. Essas mesmas empresas, entretanto, não aparecem nos quadros de curto, médio e longo prazo. A ausência das grandes empresas do setor ao longo do eixo temporal pode indicar que, por já possuírem tecnologia consolidada, não estão investindo em pesquisa de novas tecnologias para a área.

Pode-se notar que ao longo do eixo horizontal o número de universidades cresce bastante, indicando que estas estão focadas em inovação para o setor. O mapa mostra também a diversidade de *players* que estão envolvidos no desenvolvimento de novas tecnologias, mas mostra que, mesmo com essa diversidade, há um alinhamento em torno da inovação no setor de geração de energia a partir do RSU, já que o número de *clusters* de mesmo foco também aumenta ao longo do eixo horizontal.

Grande parte dos *players* que aparecem no mapa investem em pesquisas e aplicações em mais de uma taxonomia, o que demonstra um desejo de inovação em diversas frentes de pesquisa.

Em relação às tecnologias empregadas para a geração de energia a partir do RSU, podemos visualizar que no estágio atual grande parte das empresas é voltada para a “Combustão”, que nos dias de hoje é realmente a tecnologia mais empregada mundialmente. Já no curto e médio prazo, essa mesma tecnologia não aparece mais com tanta frequência, e os *players* investem mais em tecnologias relacionadas ao “Pré-tratamento” do RSU. E a longo prazo, apesar de ainda atuante no mapa, a incineração divide lugar com outras taxonomias, como a “Gaseificação” e “Insumo do Processo”, voltado para o estudo do RSU.

A diminuição da frequência da “Combustão” no mapa demonstra que, por ser uma tecnologia já empregada há anos, não existe um número expressivo de

inovações relacionadas a essa tecnologia especificamente. Assim como podemos observar o foco dos *players* em diversificar as tecnologias de produção de energia.

Já o aparecimento expressivo das taxonomias ligadas à “Insumo do Processo” e aos “Pré-tratamentos” evidencia a preocupação a curto, médio e longo prazo em tirar o maior proveito, energeticamente falando, do RSU que chega às plantas.

Em relação ao Brasil, sua quase ausência no eixo temporal demonstra mais uma vez que o país ainda tem uma longa caminhada no setor. O país possui apenas 5 dentre os 111 artigos analisados – todos de universidades - e nenhuma patente ou solicitação de patente, o que exhibe o atraso do país em relação a outros países. Entretanto, entendendo e analisando o *roadmap* é possível pensar em parcerias estratégicas para o Brasil com empresas e universidades que aparecem como *players* no mapa e já investem e possuem tecnologia avançada.

6.1 Sugestão para trabalhos futuros

A partir dos resultados obtidos foram identificadas algumas oportunidades de estudo:

- a) utilizando o *roadmap* gerado neste trabalho, é possível realizar um estudo sobre a implementação de plantas de geração de energia a partir do RSU no Brasil;
- b) elaboração de um estudo prospectivo com produção de um *roadmap* tecnológico para a geração de energia a partir de outros resíduos, como resíduos da agricultura verificando a sinergia entre os esforços tecnológicos;
- c) ampliar o presente estudo a partir da prospecção tecnológica em outras bases de dados;
- d) elaboração de um estudo prospectivo focado em sistemas híbridos de plantas de geração de energia a partir do RSU.

7. Referências

ABIOGÁS (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS). Brasil ganha frente para produzir energia a partir de resíduos urbanos, 2020. Disponível em <<https://abiogas.org.br/brasil-ganha-frente-para-produzir-energia-a-partir-de-residuos-urbanos/>>. Acesso em 8 jun 2020.

ABRELPE (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS). **Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2018/2019**, 2019

ABRELPE (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS). **Resíduos sólidos urbanos**. Caderno informativo, recuperação energética, 2012.

ABREN, Associação Brasileira de Recuperação Energética de Resíduos. **Contribuição para Consulta Pública N° 025/2019**, 2019.

ARENA, Umberto. **Process and technological aspects of municipal solid waste gasification**. A review. Waste management, [S.l], v. 32, n. 4, p. 625-639, abr. 2012.

BRASIL. Lei no 12.305, de 2 de agosto de 2010. **Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos**. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 2 ago. 2010. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm>. Acesso em 02 jun 2020.

CEMPRE, Compromisso empresarial para reciclagem. **CEMPRE Review**, 2019.

DAVIS, Mackenzie L., MASTEN, Susan J. **Princípios de Engenharia Ambiental**. 3ª edição, 2016.

ESPIRITO SANTO FILHO, Francisco do. **Estimativa do aproveitamento energético do biogás gerado por resíduos sólidos urbanos no Brasil**. 2013. Tese (Doutorado) Programa de Pós graduação em Energia, Universidade de São Paulo. 2013.

EUROPEAN COMMISSION. **Integrated Pollution Prevention and Control: Reference Document on the Best Available Techniques for Waste Incineration**. Bruxelas, European Commission, 2006a.

EUROPEAN COMMISSION. **Integrated Pollution Prevention and Control Reference: Document on the Best Available Techniques for Waste Treatments Industries**. Bruxelas: European Commission, 2006b.

FERREIRA, Bernardo Ornelas. **Avaliação de um sistema de metanização de resíduos alimentares com vistas ao aproveitamento energético do biogás**. 2015. Dissertação (Mestrado) - Programa De Pós-Graduação Em Saneamento, Meio Ambiente E Recursos Hídricos, Escola de Engenharia da Universidade Federal De Minas Gerais, Belo Horizonte, 2015.

GLOBAL WTER T COUNCIL. Sponsors.2020. Disponível em <<https://gwcouncil.org/sponsors/>> . Acesso em 29 de Janeiro de 2021

IONESCU, Gabriela. **Critical analysis of pyrolysis and gasification applied to waste fractions with growing energetic content**. 2012. Tese (Doutorado) - Mobility fund of Doctoral School in Environmental Engineering XXV Cycle, University of Trento, 2012.

KALOGIROU, Efstratios N. **Waste-to-Energy technologies and global applications**. Boca Raton: CRC Press, 2018. 244p.

KAZA, Silpa; YAO, Lisa; Bhada-Tata, Perinaz; WOERDEN, Frank. **What a Waste 2.0: A Global Snapshot of Solid Waste Management to 2050**. Washington, DC: World Bank, 2018.

KHAN, M. Rashid. **Clean energy from waste and coal**. Washington, DC: American Chemical Society, 1992. (ACS Symposium series)

LOMBARDI, Lidia; CARNEVALE, Ennio; CORTI, Andrea. **A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste**. Waste management, Nova York, v. 37, p. 26-44, dez. 2014.

MELO, A., **Com aterros saturados, região aposta em incineração de lixo - Diário do Grande ABC**, 2020. Disponível em < <https://www.dgabc.com.br/Noticia/3527773/com->

aterros-saturados-regiao-aposta-em-incineracao-de-lixo>. Acesso em: 14 de fevereiro de 2021.

PEDROZA, Marcelo Mendes et al. **Aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos em processo de pirólise**. Revista Brasileira de Energias Renováveis, [S.l.], v.6, n. 2, 2017.

ROGOFF, Marc J.; SCREVE, Francois. **Waste-to-energy: technologies and project implementation**. 2. ed. Waltham: William Andrew, 2011

SEA (SECRETARIA DE ESTADO DO AMBIENTE). **Plano Estadual de Resíduos Sólidos do Rio de Janeiro (PERS): Relatório Síntese**, Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/cidades-sustentaveis/residuos-solidos/instrumentos-da-politica-de-residuos/item/10611>> Acesso em 02 jun 2020.

SILVA, Vanessa Dal-Bó. **Potencialidades para o aproveitamento de biomassa de casca de café robusta para a geração de energia**. 2016. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Energia, Universidade Federal do Espírito Santo, 2016.

SUN, Ye; CHENG, Jiayang. **Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review**. Bioresource technology, [S.l.], v. 83, n. 1, p. 1-11, 2002.

TCHOBANOGLIOUS, George; KREITH, Frank. **Handbook of Solid Waste Management**. 2ª edição, 2002.

VISIONGAIN, **Top 20 Companies in The Waste to Energy (WtE) Market 2018**. 2018

I. Anexo A – Artigos publicados

| Título do Documento | Ano | País | Instituição |
|---|------------|-------------------------------|--|
| Energy efficiency of waste-to-energy plants with a focus on the comparison and the constraints of the 3T method and the R1 formula | 2019 | Grécia | National Technical University of Athens |
| A techno-economic analysis of energy recovery from organic fraction of municipal solid waste (MSW) by an integrated intermediate pyrolysis and combined heat and power (CHP) plant | 2018 | Reino Unido | Aston University |
| Is it worth generating energy with garbage? Defining a carbon tax to encourage waste-to-energy cycles | 2020 | Brasil | UNESP |
| Optimal process design for integrated municipal waste management with energy recovery in Argentina | 2020 | Argentina | INTEC; Universidad Nacional del Litoral |
| Potential of MSWI bottom ash to be used as aggregate in road building materials | 2018 | Lituania | Vilnius Gediminas Technical University, |
| The evolution of waste-to-energy incineration: A review | 2018 | Thailandia | Prince of Songkla University; c Center of Excellence on Hazardous Substance Management |
| Metal recovery from incineration bottom ash: State-of-the-art and recent developments | 2020 | República Tcheca / Alemanha / | Czech Academy of Sciences; Danish Waste Solutions ApS; Università di Bologna; Politecnico di Milano; |

| | | | |
|---|------|--------------------|---|
| | | Dinamarca / Italia | University of Rome Tor Vergata; |
| A Techno-economic Analysis of Anaerobic Digestion and Gasification Hybrid System: Energy Recovery from Municipal Solid Waste in South Africa | 2020 | Africa do Sul | Tshwane University of Technology; University of Johannesburg; DST-CSIR National Centre for Nanostructured Materials |
| Forecasting of GHG emission and linear pinch analysis of municipal solid waste for the city of Faridabad, India | 2019 | India | Manav Rachna International Institute of Research and Studies |
| Economic contradictions of the waste-to-energy concept and emissions reduction plan (case study, Czech Republic) | 2019 | Republica Tchecca | Czec University of Life Sciences Prague |
| Municipal solid waste to electricity using anaerobic digestion and incineration conversion technologies: A comparative study | 2019 | Indonesia | Universitas Indonesia |
| Effect of dry-solid content level in feeding slurry of municipal solid waste consumed by FSIG/GT power generation process; a theoretical study | 2019 | Brasil | UNICAMP |
| Quantitative characterization of carbonaceous and lignocellulosic biomass for anaerobic digestion | 2018 | Africa do Sul | University of Johannesburg; Vaal University of Technology; UN Environment in South Africa |

| | | | |
|---|------|---------------------|--|
| Waste-to-energy technology integrated with carbon capture – Challenges and opportunities | 2020 | Polonia/ Noruega | Silesian University of Technology; SINTEF Energy Research |
| Thermo-economic analysis of a waste-to-energy integrated multi-generation power plant | 2020 | Nigeria | University of Port Harcourt |
| Characteristics of bottom ash from municipal solid waste incineration | 2018 | Lituania | Vilnius Gediminas Technical University, |
| Feasibility of Reuse of Bottom Ash from MSW Waste-to-Energy Plants in India | 2019 | India | Indian Institute of Technology Delhi |
| Requirement of pre-processing in a waste to energy (WTE) plant based on indian Municipal Solid Waste (MSW) | 2018 | India | Teri University; Indian Institute of Technology, |
| Plasma gasification modeling of municipal solid waste from Jatibarang Landfill in Semarang, Indonesia: Analyzing its performance parameters for energy potential | 2019 | Indonesi a | Diponegoro University; |
| An investigation of an oxygen-enriched combustion of municipal solid waste on flue gas emission and combustion performance at a 8 MWth waste-to-energy plant | 2019 | China | Tianjin University; Tibet University |
| Designing Smart Energy System for Smart City through Municipal Solid Waste to Electricity: Techno-Economic Analysis | 2018 | Indonesi a | Universitas Indonesia |
| Assessment of heavy metals in RDF for thermochemical conversion | 2020 | Africa do Sul | Cape Peninsula University Technology; Durban Univerdity Technology |
| Evaluation of reclaimed municipal solid waste incinerator sands in concrete | 2019 | EUA | School of Science, Engineering, and Technology, Penn State Harrisburg, |

| | | | |
|--|------|-----------|---|
| Future district heating plant integrated with municipal solid waste (MSW) gasification for hydrogen production | 2019 | Noruega | University of Agder |
| Process simulation and optimization of municipal solid waste fired power plant with oxygen/carbon dioxide combustion for near zero carbon dioxide emission | 2018 | China | Beijing Jiaotong University |
| Volatilisation of major, minor, and trace elements during thermal processing of fly ashes from waste- and wood-fired power plants in oxidising and reducing gas atmospheres | 2020 | Finlandia | University of Eastern Finland |
| Waste-to-energy technologies applied for refuse derived fuel (RDF) valorisation | 2019 | Portugal | University of Minho |
| Evaluating greenhouse gas emissions and energy recovery from municipal and industrial solid waste using waste-to-energy technology | 2018 | Taiwan | National Taipei University |
| Waste-to-energy: Coupling Waste Treatment to Highly Efficient CHP | 2018 | Belgica | Keppel-Seghers Belgium NV; KU Leuven |
| Waste as energy source in eu action plan for the circular economy | 2018 | Letonia | Institute of Physical Energetics, Latvia |
| Optimizing energy recovery level of a Dutch waste incineration facility | 2018 | Holanda | Utrecht University; Hanze University of Applied Science |
| Energy recovery from municipal solid waste of intermunicipal public consortia identified in São Paulo State | 2019 | Brasil | UFVJM; UFABC |
| Electricity power generation from co-gasification of municipal solid wastes and biomass: Generation and emission performance | 2018 | EUA | Oklahoma State University; Georgia Southern University |

| | | | |
|---|------|--------------------------------------|--|
| Characterization of Municipal Solid Waste in Malaysia for Energy Recovery | 2019 | Malasia | International Islamic University Malaysia |
| Suitability of municipal solid waste in African cities for thermochemical waste-to-energy conversion: The case of Harare Metropolitan City, Zimbabwe | 2019 | Thailandia / Zimbabwe / Camboja | Prince of Songkla University; Environmental Management Agency, Harare; Institute of Technology of Cambodia; Center of Excellence on Hazardous Substance Management (HSM) |
| Evaluation of municipal solid wastes based energy potential in urban Pakistan | 2019 | Paquistão / Malasia / Arabia Saudita | National University of Sciences and Technology, Islamabad; University of Malaya; King Khalid University |
| Multi-criteria optimization and comparative performance analysis of a power plant fed by municipal solid waste using a gasifier or digester | 2018 | Iran | University of Tehran |
| Changes in composition and lead speciation due to water washing of air pollution control residue from municipal waste incineration | 2019 | Reino Unido / EUA | University College London; Louisiana State University |
| Key factors influencing the environmental performance of pyrolysis, gasification and incineration Waste-to-Energy technologies | 2019 | China / França | Zhejiang University of Science and Technology; Ecole des Mines Albi; |
| Clean energy from municipal solid waste (MSW) | 2019 | Brasil / EUA | Florida State University. Universidade Federal do Paraná, Instituto Politécnico Nacional |
| Uncertainty and sensitivity analyses of incinerability index | 2019 | India | IIT Delhi; North Delhi Municipal Corporation, |

| | | | |
|--|------|---------------|--|
| Hydrogen and syngas production from municipal solid waste (MSW) gasification via reusing CO₂ | 2018 | China | University of Shanghai for Science and Technology; Shanghai Urban Construction Design and Research Institute |
| Recycling municipal solid waste utilizing gasification technology: a case study | 2020 | Iran; Vietnam | Islamic Azad University; Ton Duc Thang University; |
| Steam Gasification of Municipal Solid Waste in Drop Tube Fixed Bed Reactor | 2019 | Thailand | King Mongkut's University of Technology Thonburi |
| Waste to energy bio-digester selection and design model for the organic fraction of municipal solid waste | 2018 | Africa do Sul | University of Johannesburg; Vaal University of Technology; UN Environment in South Africa |
| The growing importance of waste-to-energy (WTE) incineration in China's anthropogenic mercury emissions: Emission inventories and reduction strategies | 2018 | China | China University of Geosciences |
| Theoretical and experimental study of gas-phase corrosion attack of Fe under simulated municipal solid waste combustion: Influence of KCl, SO₂, HCl, and H₂O vapour | 2019 | China | Tianjin University; Tibet University |
| Environmental assessment of municipal solid waste by two-stage plasma gasification | 2019 | Portugal | University of Porto; University of Trás-Os-Montes and Alto Douro |
| An efficient waste management system with municipal solid waste incineration plant | 2020 | Turquia | Yildiz Technical University |
| A technique to quantify incinerability of municipal solid waste | 2019 | India | IIT Delhi; North Delhi Municipal Corporation, |

| | | | |
|--|------|----------------------------|--|
| Contamination of heavy metals and metalloids in biomass and waste fuels: Comparative characterisation and trend estimation | 2020 | Suecia | KTH Royal Institute of Technology; Vattenfall AB; Linnaeus University |
| Pyrolysis of waste feedstocks in CO₂ for effective energy recovery and waste treatment | 2019 | Coreia do Sul | Sejong University; Ajou University |
| Treatment of Organic Fraction of Municipal Solid Waste in Bioelectrochemical Systems: A Review | 2020 | India | Indian Institute of Technology Bhubaneswar |
| A combined two-stage process of pyrolysis and catalytic cracking of municipal solid waste for the production of syngas and solid refuse-derived fuels | 2020 | Espanha | Instituto de Carboquímica (ICB-CSIC) |
| Valorizing municipal solid waste: Waste to energy and activated carbons for water treatment via pyrolysis | 2018 | EUA / China / Italia | Boston University; China University of Mining and Technology; The Pennsylvania State University |
| Measurements of the NO_x precursors and major species concentrations above the grate at a waste-to-energy plant | 2018 | Dinamarca | Technical University of Denmark; Babcock and Wilcox Vølund A/S |
| Influence of recycling on the incinerability of municipal solid waste | 2020 | India | IIT Delhi; North Delhi Municipal Corporation, |
| An experimental and kinetic study of thermal decomposition of phenanthrene | 2019 | China | Tsinghua University |
| CO₂ Gasification of Municipal Solid Waste in a Drop-Tube Reactor: Experimental Study and Thermodynamic Analysis of Syngas | 2018 | China | University of Shanghai for Science and Technology; Shanghai Urban Construction Design and Research Institute |

| | | | |
|--|------|-------------------------------|--|
| Life cycle costing for plasma gasification of municipal solid waste: A socio-economic approach | 2020 | Portugal / Espanha | Faculty of Engineering of the University of Porto; Centre Tecnològic de Catalunya; University of Trás-os-Montes e Alto Douro; University of Pennsylvania |
| Use of CO₂ curing to enhance the properties of cold bonded lightweight aggregates (CBLAs) produced with concrete slurry waste (CSW) and fine incineration bottom ash (IBA) | 2020 | Hong Kong | The Hong Kong Polytechnic University |
| Gas and tar generation behavior during flash pyrolysis of wood pellet and plastic | 2020 | Japao | Kyoto University, Kobelco Eco-Solutions Co. Ltd |
| Combustion of municipal solid waste in fluidized bed or on grate – A comparison | 2020 | Suecia | Chalmers University of Technology |
| Solidification and multi-cytotoxicity evaluation of thermally treated MSWI fly ash | 2020 | China / Singapura / Hong Kong | Sichuan University, Nanyang Technological University, Zerowaste Asia Co. Ltd., The University of Hong Kong |
| The use of fly ashes from waste-to-energy processes as mineral CO₂ sequesters and supplementary cementitious materials | 2020 | Australia / Singapura | The University of Sydney, Nanyang Technological University |
| Investigation on electrical surface modification of waste to energy ash for possible use as an electrode material in microbial fuel cells | 2018 | EUA | City College of the City University of New York, Livolt LLC |
| The fate of chlorine during MSW incineration: Vaporization, transformation, deposition, corrosion and remedies | 2020 | China / Dinamarca | Tianjin University; Tibet University, Technical Univerdity of Denmark, |

| | | | |
|--|------|--------------------------------|---|
| Demonstration of estimation of incinerability of municipal solid waste using incinerability index | 2020 | India | IIT Delhi, North Delhi Municipal Corporation |
| Identifying appropriate aggregation technique for incinerability index | 2019 | India | IIT Delhi, North Delhi Municipal Corporation |
| A comparative data mining approach for the prediction of energy recovery potential from various municipal solid waste | 2019 | Canada / Iran | University of Victoria, University of Tehran, Azad University |
| Material analysis of Bottom ash from waste-to-energy plants | 2018 | Republic of the Czech Republic | Institute of Chemical Process Fundamentals of the CAS, Brno University of Technology |
| Critical Review on the Chemical Reaction Pathways Underpinning the Primary Decomposition Behavior of Chlorine-Bearing Compounds under Simulated Municipal Solid Waste Incineration Conditions | 2020 | Australia | Monash University |
| Kinetic modeling and experimental validation on the effect of KCl and SO₂ concentration on corrosion of pure Fe under simulated municipal solid waste combustion | 2018 | China | Tianjin University, Tibet University |
| Modeling of plasma and entrained flow co-gasification of MSW and petroleum sludge | 2020 | Emirados Arabes / Egipto | Khalifa University of Science and Technology, Ain Shams University, University of Sharjah |
| Life cycle assessment of pyrolysis, gasification and incineration waste-to-energy technologies: Theoretical analysis and case study of commercial plants | 2018 | França / China | Ecole des Mines Albi, Zhejiang University |
| Blending organic material with municipal solid waste incinerator bottom ash to promote in-situ carbonation in road base | 2019 | EUA | University of Florida |

| | | | |
|---|------|------------------------------|--|
| Environmental performance of alternatives to treat fly ash from a waste to energy plant | 2019 | Espanha | Universidad de Cantabria |
| Electricity generation potential and environmental assessment of bio-oil derivable from pyrolysis of plastic in some selected cities of Nigeria | 2020 | Nigeria / Africa do Sul | Tshwane University of Technology, University of Ibadan |
| Evaluating improvements in a waste-to-energy combined heat and power plant | 2019 | Suécia | University of Borås |
| Experimental investigation on anaerobic co-digestion of food waste and water hyacinth in batch type reactor under mesophilic condition | 2019 | India | S V National Institute of Technology |
| Multiscale scheme for the optimal use of residues for the production of biogas across Castile and Leon | 2018 | Espanha | University of Salamanca |
| Performance analysis and operation strategy of an improved waste-to-energy system incorporated with a coal-fired power unit based on feedwater heating | 2019 | China | North China Electric Power University, China ENFI Engineering Corporation |
| Waste to energy efficiency improvements: Integration with solar thermal energy | 2019 | Italia / Polonia | University of Florence, Niccolò Cusano University, Silesian University of Technology |
| A hot syngas purification system integrated with downdraft gasification of municipal solid waste | 2019 | Singapura / Malasia / Grécia | Nanyang Technological University, Universiti Sains Malaysia, Technical University of Crete (TUC), Nanyang Technological University |
| Thermo-environmental and economic analysis of an integrated municipal waste-to-energy solid oxide fuel cell, gas- | 2019 | Nigeria | University of Port Harcourt |

| | | | |
|--|------|------------------------------|--|
| , steam-, organic fluid- and absorption refrigeration cycle thermal power plants | | | |
| Municipal solid waste incineration bottom ash as sole precursor in the alkali-activated binder formulation | 2020 | Espanha | Universitat de Barcelona |
| Emission characteristics of parent and halogenated PAHs in simulated municipal solid waste incineration | 2019 | China | Peking University |
| Life cycle assessment of alternative processes to treat fly ash from waste incineration | 2018 | Espanha | Universidad de Cantabria |
| Gasification comparison between plasma and entrained flow: Analysis of the power plant | 2018 | Emirados Arabes / Egipto | Khalifa University of Science and Technology, Ain Shams University |
| Externalities of energy sources: The operation of a municipal solid waste-to-energy incineration facility in the greater Thessaloniki area, Greece | 2020 | Grécia | Aristotle University of Thessaloniki, International Hellenic University |
| A novel real-time monitoring and control system for waste-to-energy gasification process employing differential temperature profiling of a downdraft gasifier | 2019 | Singapura / Malasia / Grécia | Nanyang Technological University, Universiti Sains Malaysia, Technical University of Crete (TUC), Nanyang Technological University |
| Evaluation of the environmental sustainability of different waste-to-energy plant configurations | 2018 | Italia | Niccolò Cusano University, University of Florence |
| Investigation of greenhouse gas emissions and energy recovery potential from municipal solid waste management practices | 2020 | Arabia Saudita | Imam Abdulrahman Bin Faisal University main Campus, |

| | | | |
|---|------|---------------------------|--|
| Limitations and quality upgrading techniques for utilization of MSW incineration bottom ash in engineering applications – A review | 2018 | Hong Kong | The Hong Kong Polytechnic University |
| Contribution to closing the loop on waste materials: valorization of bottom ash from waste-to-energy plants under a life cycle approach | 2018 | Espanha | Universidad de Cantabria, Universitat Pompeu Fabra |
| Closing the household metal packaging cycle through recovery of scrap from waste-to-energy bottom ash: The case study of Flanders | 2019 | Belgica | KU Leuven - Group T Leuven Campus, Vereniging van Vlaamse Steden en Gemeenten vzw |
| Township-based bioenergy systems for distributed energy supply and efficient household waste re-utilisation: Techno-economic and environmental feasibility | 2019 | Reino Unido / Singapura | University of Glasgow, National University of Singapore |
| New approach of characterizing fruit and vegetable waste (FVW) to ascertain its biological stabilization via two-stage anaerobic digestion (AD) | 2020 | India | Indian Institute of Engineering Science and Technology (IEST) |
| Combining plasma gasification and solid oxide cell technologies in advanced power plants for waste to energy and electric energy storage applications | 2018 | Italia | University of Cassino and Southern Lazio, University of Naples "Parthenope" |
| The environmental and financial benefits of recovering plastics from residual municipal waste before energy recovery | 2018 | Reino Unido | The Open University, Resource and Waste Solutions LLP |
| Urban microgrid ancillary service provision using plugin electric vehicle and waste-to-energy CHP | 2020 | Iran | University of Isfahan, Yasouj University |
| Major sources of mercury emissions to the atmosphere: The U.S. case | 2019 | EUA | Columbia University |
| Regenerable Co-ZnO-based nanocomposites for high-temperature syngas desulfurization | 2020 | Singapura / Malasia / EUA | Nanyang Technological University, Colorado School of Mines, Universiti Sains Malaysia, Technical |

| | | | |
|--|------|--|--|
| | | | University of Crete (TUC), Guangdong Institute of World Soil Resources |
| Conversion of absorbent polymer wastes to syngas using pyrolysis and co2 assisted gasification | 2019 | EUA | University of Maryland |
| Municipal solid waste incineration plant: A multi-step approach to the evaluation of an energy-recovery configuration | 2018 | Italia | Politecnico di Torino |
| Development of 8 ton/day gasification process to generate electricity using a gas engine for solid refuse fuel | 2020 | Coreia do Sul | Korea Research Institute of Chemical Technology, National Institute of Environmental Research, Samho Environment Technology, Institute for Advanced Engineering, Yonsei University |
| Thermal tar cracking enhanced by cold plasma – A study of naphthalene as tar surrogate | 2020 | Belgica / Suécia | ku leuven, KTH Royal Institute of Technology, Energyville, |
| GHG emissions of incineration and anaerobic digestion: Electricity mix | 2019 | Republica Tcheca / Malasia / Reino Unido | Brno University of Technology, Universiti Teknologi Malaysia, The University of Manchester |
| Waste to energy: power generation potential of putrescible wastes by anaerobic digestion process at Hyderabad, Pakistan | 2018 | Paquistão | Mehran University of Engineering and Technology |
| Nutrient recovery technologies integrated with energy recovery by waste biomass anaerobic digestion | 2018 | Japao | Tohoku University |

| | | | |
|--|------|--------|---------|
| Energy, exergy, environmental and economic analysis of hybrid waste-toenergy plants | 2018 | Brazil | PUC-Rio |
|--|------|--------|---------|

II. Anexo B – Patentes depositadas

| Número | Título do Documento | Ano | País | Titular |
|----------------|--|------|------------|------------------------------------|
| 20200055774 | CARBONATION- ACTIVATED CLINKER BINDER FROM INCINERATION RESIDUES | 2017 | Canadá | AL-GHOULEH; Zaid |
| 20200027703 | DEVICE AND SYSTEM FOR ENERGY GENERATION BY CONTROLLED PLASMA IGNITION AND INCINERATION | 2018 | EUA | Dhyllon; Amen |
| 20200001304 | DEVICE, METHOD, AND CONTROL SYSTEM FOR WASTE TO ENERGY GENERATION AND OTHER OUTPUT PRODUCTS | 2018 | EUA | EKAMOR |
| 20190284477 | PROCESSING WASTE INTO CARBON CHAR | 2018 | Inglaterra | Wilson Bio- Chemical Limited |
| 20190153373,00 | Biofuel generation | 2016 | Índia | Chaturvedi; Deepak |
| 20180207551 | DRIVER AND CONTROL FOR VARIABLE IMPEDENCE LOAD | 2017 | EUA | FloDesign Sonics, Inc. |

| | | | | |
|-------------|--|------|------------|---|
| 20170370050 | WASTE TO ENERGY ASH AND ENGINEERED AGGREGATE IN ROAD CONSTRUCTION | 2016 | EUA | University of Florida Research Foundation, Inc |
| 20160329588 | A METHOD FOR THE RECOVERY OF ORGANIC COMPOUNDS FROM WASTEWATER FOR GENERATING ELECTRICITY | 2014 | Inglaterra | UNITED UTILITIES PLC |
| 20150167968 | Process and apparatus for covering the energy needs of communities using organic waste | 2013 | Hungria | Somogyi; Miklos |
| 20150152344 | MELT GASIFIER SYSTEM | 2014 | Singapura | Gueh; How Kiap |
| 20150101375 | ANAEROBIC DIGESTION SYSTEM FOR HOUSEHOLD ORGANIC WASTES | 2012 | Índia | Council of Scientific and Industrial Research; Manilal; Vattackatt Balakrishnan |

III. Anexo C – Patentes concedidas

| N° da Patente | Título do Documento | Ano | País | Titular |
|---------------|---|------|------|--|
| 10,688,544 | Systems and methods for processing mixed solid waste | 2017 | EUA | ORGANIC ENERGY CORPORATION |
| 10,724,029 | Acoustophoretic separation technology using multi-dimensional standing waves | 2018 | EUA | FloDesign Sonics, Inc. |
| 10,501,696 | Rotating and movable bed gasifier producing high carbon char | 2017 | EUA | Thiessen; Randall J.; Thiessen, Jr.; La Voy M. |
| 10,350,514 | Separation of multi-component fluid through ultrasonic acoustophoresis | 2017 | EUA | FloDesign Sonics, Inc. |
| 10,266,440 | Anaerobic digestion system and method | 2018 | EUA | Assadi; Abdolreza; Sleight; Ronald Scott |

| | | | | |
|------------|---|------|-----|---------------------------|
| 10,253,974 | System and method for biomass combustion | 2015 | EUA | Morgan State University |
| 10,240,091 | Process for devolatizing a feedstock | 2017 | EUA | D4 Energy Group, Inc. |
| 10,097,065 | Bioenergy storage and management system and method | 2016 | EUA | CALIFORNIA BIOENERGY, LLC |
| 10,188,119 | Method for treating a substance with wave energy from plasma and an electrical arc | 2012 | EUA | Foret Plasma Labs, LLC |
| 10,040,011 | Acoustophoretic multi-component separation technology platform | 2013 | EUA | FloDesign Sonics, Inc. |

| | | | | |
|------------|---|------|--------|----------------------------|
| 10,005,961 | Methods, systems, and devices for continuous liquid fuel production from biomass | 2014 | EUA | Proton Power, Inc. |
| 9,884,324 | Advanced solid waste sorting systems and methods | 2015 | EUA | Organic Energy Corporation |
| 9,868,964 | Solid waste treatment with conversion to gas and anaerobic digestion | 2016 | Canada | ANAERGIA INC. |
| 9,790,108 | Water/wastewater recycle and reuse with plasma, activated carbon and energy system | 2016 | EUA | Foret Plasma Labs, LLC |
| 9,771,280 | System, method and apparatus for treating liquids with wave energy from plasma | 2017 | EUA | Foret Plasma Labs, LLC |

| | | | | |
|-----------|---|------|-----|--|
| 9,725,690 | Fluid dynamic sonic separator | 2014 | EUA | FloDesign Sonics, Inc. |
| 9,724,667 | Carbon micro-plant | 2015 | EUA | Biogenic Reagents Ventures, LLC |
| 9,713,812 | Methods and systems for separating and recovering recyclables using a comminution device | 2011 | EUA | ORGANIC ENERGY CORPORATION |
| 9,700,896 | Systems and methods for processing mixed solid waste | 2013 | EUA | ORGANIC ENERGY CORPORATION |
| 9,719,062 | Gas generation | 2012 | EUA | The Board of Regents of the University of Nebraska |

| | | | | |
|-----------|--|------|--------|--|
| 9,649,666 | Mechanized separation of mixed solid waste and recovery of recyclable products using optical sorter | 2014 | EUA | ORGANIC ENERGY CORPORATION |
| 9,604,192 | Pyrolysis and gasification systems, methods, and resultants derived therefrom | 2014 | EUA | Tucker; Richard D |
| 9,567,247 | Syngas biomethanation process and anaerobic digestion system | 2013 | Canada | Anaergia Inc. |
| 9,605,211 | Process and device for devolatizing feedstock | 2014 | EUA | Hayward; David Earle (Morristown, TN), Baker; Marvin Ronnie (Simpsonville, SC) |
| 9,481,589 | System and method for improved anaerobic digestion | 2015 | EUA | Verliant Energy, Inc |

| | | | | |
|-----------|---|------|-----|-----------------------------|
| 9,604,192 | Pyrolysis and gasification systems, methods, and resultants derived therefrom | 2013 | EUA | Tucker; Richard D |
| 9,453,643 | Carpet fuel processing boiler | 2014 | EUA | Shaw Industries Group Inc. |
| 9,410,094 | Pyrolysis waste and biomass treatment | 2014 | EUA | Green Waste Energy Inc. |
| 9,365,784 | Method of reducing oxygen requirement of a coal gasifier | 2014 | EUA | General Electric Company |
| 9,278,327 | Carbon-based durable goods and renewable fuel from biomass waste dissociation for transportation and storage | 2014 | EUA | McAlister Technologies, LLC |

| | | | | |
|-----------|---|------|--------|--|
| 9,228,132 | Slurry dewatering and conversion of biosolids to a renewable fuel | 2013 | EUA | SGC Advisors, LLC |
| 9,212,058 | Synthetic hydrogen-based gas manufacture and use | 2010 | EUA | de Graffenried, Sr.; Christopher Lawrence |
| 9,169,440 | Method of using waste hot rock transfer to thermally conjoin disparate carbonaceous-rich process streams | 2012 | EUA | Carlson; Joseph W. |
| 9,121,348 | Hydrogen-rich gas combustion device | 2013 | Taiwan | Chyou; Yau-Pin (Taipei, TW), Shy; Shenqyang (Taoyuan County, TW), Liu; Chien-Chia (Taoyuan County, TW), Wu; Chih-Yang (Taoyuan County, TW) |

| | | | | |
|-----------|--|------|--------|----------------------------|
| 9,127,206 | Plasma whirl reactor apparatus and methods of use | 2014 | EUA | Foret Plasma Labs, LLC |
| 9,109,172 | Low temperature gasification facility with a horizontally oriented gasifier | 2013 | Canada | Plasco Energy Group Inc. |
| 9,061,289 | Mechanized separation and recovery system for solid waste | 2013 | EUA | Organic Energy Corporation |
| 9,023,243 | Methods, systems, and devices for synthesis gas recapture | 2014 | EUA | Proton Power, Inc. |
| 8,981,250 | Apparatus for treating a substance with wave energy from plasma and an electrical Arc | 2012 | EUA | Foret Plasma Labs, LLC |

| | | | | |
|------------|---|------|-----|------------|
| 10,435,638 | PYROLYSIS PROCESSING OF SOLID WASTE FROM A WATER TREATMENT PLANT | 2013 | EUA | Pye; David |
|------------|---|------|-----|------------|