UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE ENERGIA E AMBIENTE
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENERGIA

MARCO TSUYAMA CARDOSO

**Regulação em aproveitamento energético de resíduos:
proposições para o Brasil com base no estudo de caso sueco**

São Paulo
2019

MARCO TSUYAMA CARDOSO

**Regulação em aproveitamento energético de resíduos:
proposições para o Brasil com base no estudo de caso sueco**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
do Instituto de Energia e Ambiente da
Universidade de São Paulo para obtenção do título
de Doutor em Ciências.

Orientação: Prof^ª Dr^a Virginia Parente

Versão Corrigida

(Versão original disponível na Biblioteca do Instituto de Energia e Ambiente e na Biblioteca de Tese e Dissertação da USP)

São Paulo
2019

AUTORIZO A REPRODUÇÃO E DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTES
TRABALHOS, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA
FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

FICHA CATALOGRÁFICA

Cardoso, Marco Tsuyama.

Regulação em aproveitamento energético de
resíduos: proposições para o Brasil com base no estudo de
caso sueco. / Marco Tsuyama Cardoso; orientadora: Virginia
Parente. – São Paulo, 2019.

242f.: il; 30 cm.

Tese (Doutorado em Ciências) – Programa de Pós-
Graduação em Energia – Instituto de Energia e Ambiente da
Universidade de São Paulo.

1. Resíduos Sólidos Urbanos; 2. Planejamento Energético; 3.
Regulação; 4. Energia Renovável, 5. Biomassa; 6. Suécia

Elaborado por Maria Penha da Silva Oliveira CRB-8/6961

Folha de Avaliação

CARDOSO, Marco Tsuyama. **Regulação em aproveitamento energético se resíduos:** proposições para o Brasil com base no estudo de caso sueco. Universidade de São Paulo, 2019.

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação do Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Ciências.

Aprovado em:

Banca examinadora

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento _____

Prof. Dr. _____

Instituição _____

Julgamento _____

Dedico esta tese à minha filha Letícia e, em nome dela, a todas as gerações futuras, cujo bem-estar depende das ações que tomarmos hoje.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à paciência e ao apoio de minha esposa Alessandra e de minha filha Letícia, por terem me acompanhado durante todo meu período de doutorado.

À orientação de minha Professora, Virginia Parente e, em nome dela, a todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Energia da USP, por terem compartilhado generosamente conhecimentos e informações essenciais para este trabalho.

Também sou grato a todos os funcionários do Instituto de Energia e Ambiente da USP, e, muito especialmente, à Juliana e à Adriana.

À diretoria da ARSESP, nomeadamente ao diretor-presidente, Hélio Castro, por ter possibilitado o período de seis meses na Suécia, essencial para o desenvolvimento desta tese.

Às Professoras Marília Franco e Monica Landi, por terem recomendado em 2010 o meu nome para o programa de mestrado no Instituto de Energia e Ambiente da USP, mesmo depois de eu estar há vários anos fora da vida acadêmica. Como ficou claro, tomei gosto pela pesquisa e fui até o doutorado.

Agradeço também ao Prof. Torleif Bramryd pela calorosa recepção na Universidade de Lund, durante meu período de intercâmbio de doutorado na Suécia. Certamente aprendi muito com o senhor e com o seu país.

Por fim, aos meus pais, Sampaio e Luiza, e ao meu irmão Ivan, pelo apoio e pelas discussões enriquecedoras ao longo de toda uma vida.

RESUMO

CARDOSO, Marco Tsuyama. **Regulação em Aproveitamento Energético de Resíduos:** proposições para o Brasil com base no estudo de caso Sueco, 2019, 219p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação de Energia da Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

A Suécia alcançou níveis de excelência tanto na reciclagem quanto na recuperação energética de resíduos. De cada 100% de resíduos sólidos gerados no país, apenas 1% não são aproveitados, tendo como destino final o aterramento. Os demais 99% são utilizados tanto na reciclagem quanto na geração de energia. Esse desempenho reflete-se também na descarbonização bem-sucedida da sua economia que, de 1990 a 2016, cresceu 75%, enquanto suas emissões caíram 26% no mesmo período. Essas foram as razões pelas quais a Suécia foi tomada como paradigma de excelência para a presente tese, cujo objetivo consistiu em identificar fatores de sucesso que pudessem inspirar a evolução da regulação e das políticas públicas voltadas ao aproveitamento dos resíduos sólidos urbanos no Brasil. As visitas técnicas a nove plantas de recuperação energética por incineração e seis plantas de digestão anaeróbica suecas e as entrevistas com especialistas do país forneceram clara dimensão do estágio dessas tecnologias e das diferenças culturais, econômicas e regulatórias com relação ao Brasil. A partir das informações empíricas obtidas *in situ* e do respaldo da análise da literatura pertinente ao tema, foram identificados 15 fatores de sucesso destacados neste trabalho. Tais fatores foram usados para verificar sua potencial replicabilidade no Brasil. Dentre eles, os que mais se destacaram foram: (i) a abordagem integrada das políticas voltadas ao aproveitamento dos resíduos; (ii) o potencial de associação entre a atividade de reciclagem e de recuperação energética, muitas vezes vistas como atividades não-integráveis; e (iii) a utilização de instrumentos econômicos, como impostos e taxas, para desincentivar ações que causem prejuízo à sociedade. As lições aqui identificadas a partir do exemplo sueco representam uma inovação para o Brasil. Ademais, elas podem ser úteis a tomadores de decisão na formulação de uma estratégia de abordagem no sentido de melhorar o desempenho brasileiro, tanto na destinação adequada dos resíduos sólidos urbanos, como na sua utilização para gerar energia num contexto de descarbonização da economia.

Palavras-chave: Resíduos Sólidos Urbanos. Planejamento Energético. Regulação. Energia Renovável. Biomassa. Brasil. Suécia.

ABSTRACT

CARDOSO, M. T. **Energy from Waste Regulation:** Suggestions to Brazil based on the Sweden Study Case, 2019, 219p., Doctorate Thesis, Post-Graduation Program of Universidade de São Paulo. São Paulo, Brazil.

Sweden has reached prominent figures both in recycling and energy recovering from residues. Less than 1 percent of its municipal solid waste is landfilled, and the other 99 percent is harnessed by either recycling or producing energy. This performance has been also reflected in its economy decarbonization rate: as noticed, the country's GDP raised 75% while its emission decreased 26% during the period 1990-2016. This is why the Sweden was chosen as benchmark in this thesis, which main objective was to identify key success factors that could inspire better practices in regulation and public policies regarding the energy and material recovering from municipal solid waste in Brazil. To achieve this objective, 9 incineration plants and 6 anaerobic digestion facilities were visited. Additionally, several Sweden experts were interviewed. Those visits and interviews delivered a clear outlook of the stage of excellence of Sweden regarding not only the technologies applied to energy recovery from waste, but also outlined the cultural, economic and regulatory differences between Sweden and Brazil. Nonetheless, supported by the pertinent literature along with the *in situ* empirical observations, 15 success factors were outlined. Additionally, those success factors were analyzed to check their potential applicability to Brazil. Among them, three were highlighted: (i) the integrated policy approach; (ii) the recycling and energy recovery from waste integration; and (iii) the use of economic instruments (such as taxes and tariffs) in order to discourage practices that negatively impact the whole society. The lessons learned from the Swedish example are novelty to Brazil. These lessons can also be useful to decision and opinion makers to advocate actions and formulate strategies that can contribute to improve the Brazilian performance regarding proper waste destination in the economy decarbonization.

Keywords: Municipal Solid Waste. Energy Planning. Regulation. Renewable Energy. Biomass. Sweden.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Pirâmide invertida com o conceito de hierarquia de resíduos.....	23
Figura 2 – Planta esquemática de uma Usina de Reciclagem Energética	30
Figura 3 – Porcentagem de resíduos incinerados	37
Figura 4 – Destinação de resíduos em alguns países.....	38
Figura 5 – Crescimento da geração de RSU 2016-2017	59
Figura 6 – Destinação dos resíduos do litoral paulista	59
Figura 7 – PIB real da Suécia e emissões domésticas de CO ₂ equivalente.....	80
Figura 8 – Imposto de carbono ao longo dos anos	90
Figura 9 – Monitor de sontrol sobre o sistema de <i>District Heating</i> da cidade de Jönköping.....	94
Figura 10 – Ponto de entrega de latas e garrafas PET usadas	98
Figura 11 – Resíduos sólidos urbanos destinados a aterros (toneladas).....	100
Figura 12 – Ponto de Coleta da Cidade de Boras	106
Figura 13 – Centro de Reciclagem do município de Kil	107
Figura 14 – Desempenho das plantas de recuperação energética suecas	109
Figura 15 – Produção de biogás na Suécia	119
Figura 16 – Trailers gaseificadores usados nos ônibus urbanos da cidade de Estocolmo, na década de 1940	121
Figura 17 – Desenvolvimento de biogás na Suécia.....	122
Figura 18 – Plantas Biogás na Escânia.....	125
Figura 19 – Estações de abastecimento na Escânia.....	125
Figura 20 – Tratamento de resíduos urbanos – instrumentos usados	134
Figura 21 – Província de Estocolmo e rede de distribuição de calor	141
Figura 22 – Planta de Södertälje da Söderenergi.....	142
Figura 23 – Controle de qualidade na planta da Söderenergi.....	143
Figura 24 – Planta de biometano da Scandinavian Biogas.....	144
Figura 25 – Capa da página Green Gothenburg	149
Figura 26 – Planta de recuperação energética da Sysav localizada em Spillepeng.....	157
Figura 27 – A sexta caldeira fica num prédio separado da Kraftvärmeverket	166
Figura 28 – Controle de operações da planta de biometano da VafabMiljö	168
Figura 29 – A planta de Gästad se divide em moderna e a antiga	172

Figura 30 – Vista Aérea de Filborna, onde a maioria das empresas de Vera Park se localiza.....	175
Figura 31 – A Planta de Filbornaverket da Öresundskraft, localizada nas dependências da NSR..	177
Figura 32 – Ônibus movido a biometano na cidade de Helsingborg	179
Figura 33 – Palestra inaugural da <i>Conferência Opening the Bin</i>	183
Figura 34 – A planta de Torsvik da Jönköping Energi.....	184
Figura 35 – A planta de Ryaverket que fica próxima da cidade.....	188
Figura 36 – Um dos centros de Reciclagem da cidade de Borås.....	191
Figura 37 – Leitores ópticos para separar os sacos plásticos	192
Figura 38 – Planta de Biometano na estação de tratamento de Sobacken.....	193
Figura 39 – Planta de Kraftvärmeverk em Björkborn	196
Figura 40 – Planta Lersätters do município de Kil.....	199
Figura 41 – <i>District Heating</i> em Kil.....	200
Quadro 1 – Plantas de biogás no país.....	67

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição do biogás, gás de aterro e gás natural	41
Tabela 2 – Biogás e biometano na Europa	52
Tabela 3 – Potencial de biometano no Estado de São Paulo	69
Tabela 4 – Crescimento econômico da Suécia de 1850 a 1950.....	73
Tabela 5 – Capacidade de geração de eletricidade sueca	87
Tabela 6 – Receitas suecas de impostos de energia e carbono em 2016.....	91
Tabela 7 – Destinação e tratamento final de RSU na Suécia	104
Tabela 8 – Destinação e tratamento final de RSU na Suécia	104
Tabela 9 – Destinação e tratamento final de RSU na Suécia	104
Tabela 10 – Redução de poluentes de plantas de <i>Waste-to-Energy</i> de 1985 a 2007.....	110
Tabela 11 – Distribuição de plantas de biogás por substrato	114
Tabela 12 – Requisitos de biometano em países europeus.....	116
Tabela 13 – Parâmetros do Biogás para uso veicular na Suécia	118
Tabela 14 – Potenciais teórico e práticos de produção de biogás na Suécia e na Província de Estocolmo	126
Tabela 15 – Metas de reciclagem da responsabilidade estendida dos produtores.....	135
Tabela 16 – Redução das emissões da planta Sävenäs, da Renova.....	151

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABRELPE	Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica.
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
APC	Controles de Poluição de Ar
ARSESP	Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo
BAT	Best Available Technology
BEM	Borås Energi Och Miljö
BFBC	Fluidized Bed (BFBC
BIG	Banco de Geração Elétrica
CAA	Clean Air Act
CFBC	Circulating Fluidized Bed
CHP	Combined Heat and Power
DEFRA	Department for Environment Food and Rural Affairs
EC	European Commission
EEA	European Environment Agency
EFW	Energy from Waste
EMAE	Empresa Metropolitana de Água e Energia
EP	European Parliament
EPA	Environmental Protection Agency
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
EU ETS	Esquema Europeu de Comércio de Emissões
EUR-LEX	Direito da União Europeia
FMI	Fundo Monetário Internacional
GBio	Grupo de Pesquisa em Biomassa da USP
IEA	International Energy Agency
IEE	Instituto de Energia e Ambiente
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
IVL	Instituto de Pesquisa Ambiental Sueco
KVVT	Kraftvärmeverket Torsvik

LPG (GPL)	Gás de Petróleo Liquefeito
MACT	Tecnologia de Controle Máxima Alcançada
MDL	Mecanismo de Desenvolvimento Limpo
MME	Ministério de Minas e Energia
NID	Novel Integrated Desulfurization
NSR	Nordvästra Skånes Renhållnings
OCDE (OECD)	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OMC	Organização Mundial do Comércio
ONU	Organização das Nações Unidas
PIB	Produto Interno bruto
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PNUMA	Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente
PPP	Parceria Público-Privada
PSA	Pressure Swing Adsorption
PURPA	Política Regulatória de Concessionárias Públicas
PWS	Pressurized Water Scrubbing
RCGI	Research Centre for Gas Innovation
RDF	Refused Derived Fuel
RED	Diretiva de Energia Renovável
RSU	Resíduos Sólidos Urbanos
SEA	Swedish Energy Agency
SEK	Coroas Suecas
SL	Stockholms Läns Landsting
SNCR	Selective Non-Catalytic Reduction
UE	União Europeia
UNDP	United Nations Environment Programme
UNECE 4	Convenção para Poluição de Ar de Longa Distância
UNEP	United Nations Development Programme
UNFCCC	Convenção Quadro das Mudanças Climáticas das Nações Unidas
USP	Universidade de São Paulo
WTE	Waste to Energy

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	19
1.1 OBJETIVOS E QUESTÃO CENTRAL	20
1.2 METODOLOGIA.....	21
2 GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SEU IMPACTO NO CLIMA	23
2.1 ROTAS TECNOLÓGICAS PARA RECUPERAR ENERGIA DOS RESÍDUOS	25
2.1.1 Tratamento térmico com recuperação energética	26
2.1.2 Evolução em incineração	27
2.1.3 Outras rotas térmicas	33
2.1.4 District Heating	35
2.1.5 Produção de Eletricidade	36
2.1.6 Experiências Externas.....	37
2.2 DIGESTÃO ANAERÓBICA E BIOGÁS.....	39
2.2.1 Processo de purificação do biogás.....	42
2.2.1.1 Absorção.....	42
2.2.1.2 Pressure Swing Adsorption	43
2.2.1.3 Separação por membrana.....	44
2.2.1.4 Separação criogênica e outras possibilidades	44
2.2.1.5 Contaminantes típicos do biogás	45
2.2.2 Remoção de contaminantes	47
2.2.3 Experiências mundiais	51
2.3 ROTAS TECNOLÓGICAS E SUAS PERSPECTIVAS NO BRASIL	54
2.4 SITUAÇÃO ENERGÉTICA E INTERFACE COM RSU NO BRASIL	55
2.4.1 A questão dos resíduos no Brasil.....	58
2.4.2 Lei de Resíduos Sólidos	61
2.4.3 Potencial de recuperação energética no Brasil	63
2.4.4 Recuperação energética por incineração no Brasil.....	65
2.4.5 Biogás e biometano no Brasil	66
2.5 ASPECTOS PRINCIPAIS DO CAPÍTULO 2.....	70
3 ANÁLISE DO CASO SUECO (<i>BENCHMARKING</i>)	71
3.1 POLÍTICAS AMBIENTAIS SUECAS.....	75

3.1.1 História das Políticas Ambientais Suecas.....	77
3.2 CLIMA E ENERGIA NA SUÉCIA	83
3.2.1 Regulação em energia.....	89
3.2.2 District Heating na Suécia	92
3.3 GESTÃO DE RESÍDUOS NA SUÉCIA	94
3.3.1 Regulação atual em Resíduos Sólidos	100
3.3.2 Estágio atual da Gestão de Resíduos na Suécia.....	103
3.4 PLANTAS DE INCINERAÇÃO (WASTE-TO-ENERGY) NA SUÉCIA	108
3.5 DIGESTÃO ANAERÓBICA NA SUÉCIA.....	113
3.5.1 Regulação de biogás na Suécia.....	117
3.5.2 Biometano de Resíduos	118
3.5.3 Biometano no Transporte na Suécia	120
3.6 ECONOMIA CIRCULAR E QUESTÕES SOBRE O FUTURO.....	127
3.7 ASPECTOS PRINCIPAIS DO CAPÍTULO 3	130
4 VISITAS TÉCNICAS E ANÁLISE DAS SOLUÇÕES ENCONTRADAS	133
4.1 CIDADES MAIORES E SUAS ESTRATÉGIAS NA GESTÃO DE RSU.....	137
4.1.1 Estocolmo, o desafio da capital do país.....	137
4.1.2 Gotemburgo e a apresentação de soluções sustentáveis	148
4.1.3 Malmö e o foco no <i>District Heating</i>	155
4.1.3.1 A Planta de Recuperação Energética	157
4.1.3.2 Matéria-prima para biometano	161
4.1.3.3 Medidas de reciclagem e preparação para o futuro	162
4.2 AS CIDADES MÉDIAS E SEUS DESAFIOS NA GESTÃO DE RSU	163
4.2.1 Västerås: duas empresas para duas rotas	164
4.2.1.1 A Planta Kraftvärmeverket	165
4.2.1.2 A planta de biometano	167
4.2.2 Linköping e a importância da Tekniska Verken.....	171
4.2.3 Helsingborg e as parcerias para a economia circular	174
4.2.3.1 Öresundskraft	176
4.2.3.2 OX2	179
4.2.3.3 TMR	180
4.2.3.4 Envir	180
4.2.3.5 FEAB Partners	181
4.2.3.6 iTunnes	182

4.2.3.7 Movimentação pela economia circular em Helsingborg	182
4.2.4 Jonköping e o foco na energia térmica	183
4.3 AS CIDADES PEQUENAS E SOLUÇÕES PARA ESCALAS REDUZIDAS.....	187
4.3.1 Borås: energia de resíduos no antigo polo têxtil.....	187
4.3.1.1 Outras destinações dos resíduos sólidos em Borås.....	191
4.3.1.2 Biogás e biometano	192
4.3.2 Kristianstad tratando resíduos alimentares de Malmö.....	194
4.3.3 Kalskorga e a prestação de serviços de tratamento de resíduos para a região.....	195
4.3.3.1 Reciclagem e biometano.....	197
4.3.4 Kil e a competitividade do <i>District Heating</i>	198
4.4 ASPECTOS PRINCIPAIS DO CAPÍTULO 4.....	200
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	203
5.2 REFLEXÕES SOBRE A REPLICABILIDADE DO SISTEMA NO BRASIL	212
6 CONCLUSÃO.....	219
REFERÊNCIAS	225

1 INTRODUÇÃO

A disposição final de resíduos sólidos urbanos é um dos principais problemas brasileiros. Como exemplo, chamou atenção a quantidade de resíduos sólidos fluando na Baía de Guanabara, antes dos Jogos Olímpicos de 2016, fato que suscitou não apenas preocupação com a saúde dos atletas, mas também envergonhou o país (CLARKE, 2015). Cerca de sete milhões de toneladas de resíduos por ano sequer são coletadas no Brasil, e, conseqüentemente, são jogados diretamente no solo ou em corpos d'água, criando condições favoráveis para a contaminação da água e proliferação de doenças, com desdobramentos sobre as questões de saneamento (GARCILASSO; COELHO, 2016).

Em contraste, a Suécia é apresentada de modo muito distinto em matérias jornalísticas. Tais matérias destacam seu exemplo de responsabilidade ambiental e o fato de que o país, por causa das taxas de reciclagem e geração energética a partir de resíduos, chega a precisar de lixo do exterior para atender a sua demanda energética, fazendo isso de forma economicamente competitiva (BEVANGER, 2015).

Neste contexto, a presente tese analisa a regulação do aproveitamento energético de resíduos na Suécia com o objetivo de verificar se o Brasil pode replicar de alguma forma essa experiência. A Suécia é considerada um exemplo para o mundo em vários aspectos concernentes a políticas públicas voltadas ao desenvolvimento. Com efeito, é reconhecida mundialmente por: (i) sua expressiva riqueza (apresenta o décimo maior PIB per capita mundial)¹; (ii) seu elevado índice de desenvolvimento humano (detém o 14º maior IDH)²; (iii) seu alto índice de competitividade (é o sexto país mais competitivo do planeta)³; e (iv) por estar entre os países com menor desigualdade (apresenta o 12º menor Índice Gini)⁴.

Além disso, a Suécia também é reconhecida por seu aspecto pacifista. Seu último conflito bélico foi em 1814. Porém, acima de tudo, o país se destaca por seu compromisso com o meio ambiente. Pioneiro em muitas iniciativas ambientais, ele tem proeminência tanto na reciclagem quanto na recuperação energética de resíduos. Menos de 1% dos seus resíduos são aterrados.

¹ FMI 2016.

² UNEP, 2015.

³ SCHWAB; SALA-I-MARTIM, 2016.

⁴ THE WORLD BANK, 2018.

Tendo esse panorama em mente, este capítulo introdutório dedica-se a explicitar a estrutura da presente tese. Assim, a seguir estão expostos, não apenas o objetivo principal, mas também seus objetivos adjacentes, bem como a questão central que o trabalho buscou responder, e, por fim, a metodologia empregada ao longo da pesquisa.

1.1 OBJETIVOS E QUESTÃO CENTRAL

A principal motivação deste estudo foi entender as razões por trás das diferenças entre Brasil e Suécia com o objetivo de incrementar a gestão de resíduos sólidos urbanos (RSUs) em território brasileiro. O intuito foi apresentar uma contribuição para o aprimoramento da gestão de resíduos no Brasil, aproximando-o, na medida do possível, da realidade sueca. Assim, uma vez que o Brasil tem vários desafios com relação à forma de lidar com seus resíduos sólidos urbanos, as conquistas suecas podem inspirar os formuladores de políticas públicas e regulação brasileiros a enfrentar os desafios domésticos. Esta tese se propõe a contribuir com esse processo.

Dessa forma, o *principal objetivo* do presente trabalho consiste em apresentar propostas baseadas na experiência sueca de regulação, tanto em gestão de resíduos como em energia e saneamento, que possam aumentar a reciclagem e o aproveitamento energético de resíduos no Brasil. Adicionalmente, como *objetivos adjacentes*, o trabalho pretende:

- a) Identificar os fatores de sucesso da Suécia relativos à gestão de RSU;
- b) Analisar a adequação ou não das políticas suecas à realidade brasileira, considerando seu potencial aproveitamento;
- c) Difundir conhecimento relativo à gestão ambiental, de modo que seja superada a percepção de que a única solução adequada e viável para o tratamento de resíduos sólidos não recicláveis seja o aterro sanitário;
- d) Desmistificar o impacto ambiental da tecnologia de recuperação energética por incineração, até então mal vistos no Brasil;
- e) Indicar rotas para a disseminação de recuperação energética de resíduos por meio da digestão anaeróbica;
- f) Apoiar, com informações, os potenciais investidores e atores chaves sobre as formas de recuperação energética de resíduos;

- g) Descrever e analisar a abordagem das autoridades e dos estudiosos suecos com relação às soluções de recuperação energética de resíduos;
- h) Oferecer uma visão holística da gestão de resíduos com base na experiência sueca.

Quanto à questão central que este trabalho buscou responder, ela pode ser explicitada da seguinte forma:

Qual aprendizado pode ter o Brasil a partir da experiência sueca com relação à regulação de RSU e à geração de energia que aumentem a taxa de reciclagem e recuperação energética de seus resíduos de forma eficiente?

1.2 METODOLOGIA

A abordagem metodológica desta tese baseia-se na análise de estudo de caso. De acordo com Yin (2003), o estudo de caso é a metodologia mais apropriada para investigar um fenômeno de elevada complexidade, especialmente naqueles em que o investigador tem pouco controle sobre as variáveis e sobre eventos que ocorrem simultaneamente à pesquisa ou que continuam em evolução, como nos casos das políticas direcionadas à gestão de RSUs.

O autor afirma ainda que a metodologia do estudo de caso funciona para jogar luz em uma decisão ou num grupo de decisões, bem como nas razões pelas quais tais decisões são tomadas, ou como foram implementadas e seus resultados. Nesse sentido, o objeto deste estudo é entender como o governo sueco estabeleceu o seu marco regulatório, como foram decididos e implantados esquemas de incentivo para reduzir o desperdício de recursos energéticos e materiais.

Yin (2003) especifica também que um tópico comum de estudos de caso é a análise de programas de incentivos públicos, tais como programas federais, estaduais ou locais. Esse é exatamente a situação desta tese que analisa os programas de incentivo que levaram a Suécia a aterrar apenas uma fração insignificante de seus resíduos e a ter altas taxas tanto de reciclagem quanto de recuperação energética.

A Suécia, portanto, é, metodologicamente, tratada como uma referência ou *benchmark*. De acordo com Blokland (2010), a técnica de estudo de *benchmarking*, depois de ter sido usada pelo setor privado para melhorar resultados das empresas, tornou-se também importante para formuladores de políticas e reguladores de serviços públicos.

Nesse sentido, o presente estudo reuniu documentos, depoimentos e dados empíricos coletados na Suécia a fim de verificar as estratégias dos governos central e locais para fomentar a recuperação energética de resíduos por incineração ou digestão anaeróbica. Foram realizadas nove visitas técnicas em *plantas de incineração* suecas nas cidades de Malmö, Helsingborg, Borås, Kils, Kalskorga, Västerås, Södertälje, Linköping e Jonköping. Além dessas, foram também feitas seis visitas técnicas em *plantas de digestão anaeróbica e produção de biometano* nas cidades de Helsingborg, Borås, Kalskorga, Västerås, Huddinge e Kristianstad.

Ademais, para fundamentação das informações, foram realizadas 25 entrevistas não estruturadas. Dentre as pessoas entrevistadas estavam dirigentes e técnicos das plantas visitadas, especialistas suecos da área de resíduos da Agência de Meio Ambiente da Suécia, professores da Universidade de Lund, além de pesquisadores que participaram da *Conferência Opening the Bin*, realizada na cidade de Helsingborg em abril de 2017.

A partir da identificação e análise dos fatores de sucesso do caso sueco – verificados não apenas nesses depoimentos e visitas, mas também através do exame da literatura pertinente ao tema – discutiu-se a possibilidade de sua replicabilidade no Brasil, levando em conta as diferenças econômicas, sociais, culturais e institucionais entre os dois países.

Do ponto de vista de sua estrutura, a presente tese encontra-se subdividida em cinco capítulos. Além deste capítulo introdutório no qual se procurou explicitar os objetivos do trabalho, a relevância do tema, a metodologia voltada aos processos do estudo de caso, o segundo capítulo, a seguir, dedica-se à revisão da literatura, com foco na definição de conceitos utilizados como a recuperação energética de resíduos pelas tecnologias de *incineração* e de *digestão anaeróbica*. No terceiro capítulo, são apresentados o caso sueco relativo à gestão de RSU e geração de energia, inseridos no seu contexto histórico. O quarto capítulo dedica-se ao detalhamento das plantas de recuperação energética de resíduos, e do resultado das entrevistas com especialistas. O quinto consolida os resultados obtidos e as discussões suscitadas, focando na análise de replicabilidade no Brasil dos fatores de sucesso identificados no caso sueco. Por fim, o sexto capítulo, contempla as principais conclusões e considerações finais do trabalho.

2 GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS E SEU IMPACTO NO CLIMA

De acordo com o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente⁵ (PNUMA), o conceito base da gestão de resíduos segue o conceito da hierarquia de resíduos (UNEP, 2013). Basicamente, a hierarquia lista, por ordem de preferência, as ações de gestão de resíduos.

Nessa hierarquia, a ordem de prioridade é lida de cima para baixo. Assim sendo, a ação preferida é a de *prevenção* da geração de resíduos, seguida pela ação de *redução* dos mesmos, evitando, assim, o desperdício de materiais e energia. Abaixo desse nível vem a ação de *reciclagem*, processo no qual ocorre algum desperdício de materiais e reciclagem. Mais abaixo, nessa sequência, está a *recuperação energética*, na qual há desperdício significativo de materiais; por fim, vem o aterramento, no qual praticamente não há qualquer recuperação, desperdiçando-se tanto os materiais contidos nos resíduos bem como seu potencial energético. Essa hierarquia é comumente apresentada na forma de uma pirâmide invertida, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Pirâmide invertida representando o conceito de hierarquia de resíduos.

Fonte: UNEP (2013).

Em alguns casos, existem instalações de recuperação de energia de aterros por meio de coleta de biogás, mas com rendimento muito pequeno. Há várias iniciativas para aumentar a eficiência na recuperação do biogás. No entanto, quando se refere à gestão ambiental, a ação

⁵ Em português: Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA) ou Programa das Nações Unidas para o Ambiente (PNUA); em inglês: United Nations Environment Programme (UNEP).

mais importante é subir na hierarquia, que é base da quase totalidade das políticas de resíduos, com pequenas diferenças entre elas.

Por exemplo, em algumas políticas a compostagem está no mesmo nível que a reciclagem; em outras, uma está acima da outra. De qualquer forma, a parte de baixo da hierarquia é sempre a mesma, com a recuperação um patamar acima do aterramento (BRANDES; BERENYI, 2014). A prática comum no Brasil de jogar resíduos diretamente no solo (lixões) ou corpos d'água não está listada por não ser considerado gestão.

Portanto, num sentido amplo, a hierarquia de resíduos: “reconhece o grau de benefícios ambientais e sociais das opções de gestão de resíduos e ajuda a comunidade a integrá-los em uma estratégia coesa que atenda às necessidades das mesmas comunidades” (BRANDES; BERENYI, 2014, p. 14).

Como estabelecido na hierarquia de resíduos, a recuperação energética é melhor do que o aterramento, já que aproveita conteúdo energético dos resíduos. Com isso, substitui os combustíveis fósseis na geração de eletricidade, calor e reduz seu uso no transporte dos resíduos (DEFRA, 2014).

De acordo com Jacobsson *et al.* (2006), o valor calorífico de uma tonelada de óleo é equivalente a aproximadamente: 1,6 toneladas de carvão/resíduos de borracha; ou 4,5 toneladas de *pallets* de madeira; ou cinco toneladas de madeira não processada; ou quatro toneladas de resíduos. Por isso, se destinados à produção de energia, cerca de quatro toneladas de resíduos poderiam evitar a queima de, em média, uma tonelada de óleo e das emissões a ele associadas.

Os autores relacionam outras vantagens em relação ao aterramento como: a) o não vazamento para lençóis freáticos; b) baixas emissões; c) ausência ou não emissão de metano; d) retorno obtido tanto com a venda de energia quanto com o tratamento de resíduos; e) além da liberação de espaços físicos para outros propósitos que não para a “estocagem” de resíduos.

Adicionalmente, Bolognesi (2010) ressalta mais três desvantagens do aterramento com relação à incineração: a) a falta de espaços para aterramento; b) o reduzido ciclo de vida dos aterros; c) a necessidade de remediação no encerramento de aterros. Por outro lado, a resistência mais comum contra a recuperação de energia é relacionada ao alegado impacto nas taxas de reciclagem, uma vez que é comum acreditar que as plantas de incineração poderiam competir com a cadeia de recicláveis de plástico e papel.

Não obstante, Brandes e Berenyi (2014) lembram que esses argumentos são baseados na ideia de que todo resíduo sólido urbano pode ser reciclado, o que atualmente está longe de ser realidade. Pelo contrário, os números mostram que os países com melhor taxa de reciclagem são também aqueles que mais retiram energia dos resíduos.

2.1 ROTAS TECNOLÓGICAS PARA RECUPERAR ENERGIA DOS RESÍDUOS

A reciclagem pode ser considerada uma forma de recuperar energia dos resíduos, uma vez que economiza grande quantidade de energia se comparada a todo o processo de fabricação linear, desde a retirada da matéria-prima da natureza até o produto final (HENRIQUES, 2004). Adicionalmente, a energia pode também ser recuperada diretamente do conteúdo energético dos resíduos, com ou sem subprodutos, conforme complementa o autor.

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) (2009), a reciclagem pode economizar entre 0,66 e 1,45 MWh em cada tonelada de resíduos sólidos. Contudo, a Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (Abrelpe) considera que o potencial da reciclagem poderia ser maior e lograr economizar entre 1,19 e 2,97 MWh por tonelada.

Além do mais, há de se considerar a recuperação do material que preserva recursos naturais. Por essa razão, o Princípio da Hierarquia da Gestão de Resíduos considera sempre a reciclagem uma opção superior a outras formas de recuperação energética de resíduos.

No que diz respeito a tecnologias diretas de recuperação energética de resíduos, há duas rotas tecnológicas principais. A primeira usa a ação de microrganismos para transformar a matéria orgânica em gás combustível, o biogás. A segunda usa o poder calorífico dos resíduos diretamente (HENRIQUES, 2004). Existe uma pequena disputa entre as rotas, mas ambas podem ser combinadas e fazer parte de um plano energético (EPE, 2009).

2.1.1 Tratamento térmico com recuperação energética

No que tange ao tratamento térmico com recuperação energética para resíduos, entre as rotas tecnológicas principais se destacam: a incineração, a pirólise e a gaseificação. Dentre essas, a rota tecnológica mais consolidada é da incineração.

A incineração, por sua vez, pode ser feita por duas formas alternativas principais. A primeira é a queima direta, conhecida como *Mass Burning* ou *Grate-firing*, em que o resíduo é colocado diretamente numa grelha. Já a segunda requer um pré-tratamento para homogeneizar o resíduo que passa a ser chamado de *Residue Derived Fuel* (RDF), para só depois entrar na câmara de incineração, que, na maioria dos casos, são leitos fluidizados (*fluidized bed*), produzindo melhor condições para a geração de vapor, o que tende a compensar os custos mais altos da operação (HASAN; AHSANT, 2015).

Essas técnicas são bastante consolidadas ao redor do mundo, mas existem outras rotas térmicas que podem ser usadas no tratamento de resíduos com recuperação energética que têm recebido bastante atenção: pirólise, gaseificação e gaseificação por plasma. Gaseificação é a termo conversão da matéria orgânica com limitada presença de oxigênio que proporciona uma conversão parcial em um gás síntese, também conhecido por *syngas*.

Os principais componentes do *syngas* são H_2 e CO , com menores concentrações de CO_2 , H_2O , CH_4 , grandes hidrocarbonetos e N_2 . Esse gás pode ser usado para combustão ou para sintetizar combustíveis ou químicos (MORRIN *et al.*, 2012). Essa flexibilidade é a principal razão pelo crescente interesse na rota. Pirólise tem o mesmo princípio, mas com total restrição de oxigênio produz principalmente bio-óleo.

Embora a gaseificação e a conversão térmica com oxigênio restrito não sejam novas (uma vez que há uma grande história que inclui o surgimento da iluminação das ruas no século XIX) o uso de resíduos como combustível e novas tecnologias como o plasma e a aplicação do *syngas* na indústria química, trouxeram novas perspectivas para a antiga tecnologia (CARDOSO, 2014).

2.1.2 Evolução em incineração

Apesar das novas tecnologias, indiscutivelmente a rota mais consolidada é a incineração. Há muito tempo a incineração tem sido uma solução para lidar com resíduos e evitar a proliferação de infecções e doenças. Mas, à medida que as cidades ganharam importância, a gestão de resíduos se tornou importante e algumas cidades passaram a usar a incineração de modo sistemático.

Em 1874, a cidade de Nottingham, na Inglaterra, instalou uma planta chamada “The Destructor” e apresentou a primeira iniciativa de incineração sistemática de seus resíduos (BARBALACE, 2003). Pouco tempo depois, em 1885, Nova York construiu a sua primeira planta de incineração (EPA, 2016).

De acordo com Clark (2003), entre o final do século XIX e início do XX, a maioria dos especialistas sanitaristas e engenheiros costumava elogiar os “destruidores”. Por exemplo, em 1898, J. H. Maxwell declarou que para a época, a destruição de resíduos por cremação era entendida como, ao mesmo tempo, a mais sanitária e eficiente, não raro, o único meio de uma disposição satisfatória.

Em 1893, também o Departamento de Limpeza da Cidade de Edimburgo decidiu construir um destruidor de dez células em Powderhall, com um investimento de £16,000, para acabar com os montes de lixo insalubre. E o consenso médico fez com que as incineradoras se espalhassem na Inglaterra.

Em 1912, existiam mais de 338 incineradores de lixo na Grã-Bretanha; mais de 80 já geravam eletricidade para uso local. Mas durante os anos 1910 começaram a surgir reclamações sobre os efeitos causados pela poluição (CLARK, 2003). Segundo o autor, esses ciclos de entusiasmo e crítica resultaram em três diferentes fases das plantas de incineração no Reino Unido: 1876-1914; 1969-1981; 1996-hoje.

Na América, o fenômeno também se espalhou cedo. Na virada do século XX, os EUA experimentaram sua primeira grande urbanização. Entre 1860 e 1910, a população americana quase triplicou, passando de 31 milhões para 91 milhões, mas o número de habitantes na cidade aumentou sete vezes, de seis milhões para 44 milhões. Em 2010, quase metade dos americanos eram urbanos (PHILLIPS, 1998).

As distâncias crescentes e o aumento dos fretes para localidades mais distantes com veículos não compactadores fizeram com que a incineração crescesse (HICKMAN JR, 2001). Na metade do século XX, centenas de incineradores estavam em operação nos Estados Unidos. A expansão apenas freou na década de 1960, quando surgiu a consciência ambiental e preocupação com os impactos na água e no ar causados pelos incineradores.

Essa consciência levou à Lei do Ar Limpo – *Clean Air Act* (CAA), instituída em 1970, pela qual incineradores existentes ficaram submetidos a novos padrões que restringiram as emissões de particulados. O mercado de recuperação de energia de resíduos passou por um grande desafio, e as empresas que não instalaram a tecnologia para atender aos requisitos exigidos pela CAA fecharam (EPA, 2016).

Contudo, por outro lado, as empresas receberam incentivos e regulação que as fomentaram a partir da crise de petróleo nos anos 1970. Efetivamente, a principal política foi a aprovação pelo congresso da Lei de Política Regulatória de Concessionárias Públicas (PURPA), de 1978. A regulação estabeleceu que o preço pago pela eletricidade de “Plantas Qualificadas”, que incluíam incineradoras com recuperação energética, deveria ser equivalente ao custo de energia e de capacidade evitados.

Com isso, as plantas de recuperação energética – Waste-to-Energy (WTE) – recebiam um preço maior pela eletricidade gerada do que receberiam de outra forma (WILLIAMS, 2011). Em 1990, outra regulação da Agência Americana de Meio Ambiente (EPA) – Tecnologia de Controle Máxima Alcançada (MACT) – resultou numa reforma dos sistemas de Controles de Poluição de Ar (APC) de muitos sistemas e tornou os aterros menos caros.

Esses fatores afetaram a maioria da lucratividade das plantas de recuperação energética de resíduos e muitas tiveram de fechar. Novos incentivos, como isenção de impostos para renováveis (que incluem WTE) nas leis de Criação de Empregos Americanos (*American Jobs Creation Act*, de 2004) e de Reinvestimento e Recuperação Americana (*American Recovery and Reinvestment Act*, de 2009), tentaram impulsionar a indústria novamente, mas sem muitos resultados (WILLIAMS, 2011).

No Japão, em função da falta de espaço, as preocupações com a destinação dos resíduos começaram cedo. A primeira lei de limpeza das águas foi promulgada ainda em 1900, definindo a coleta e a disposição de lixo como responsabilidades dos municípios. A lei colocou ainda as operadoras de tratamento de resíduos sob supervisão das organizações governamentais, criando um sistema de administração de resíduos. Segundo a lei, o lixo deveria ser incinerado, se possível.

No período pós-guerra, o problema cresceu dramaticamente em função do rápido crescimento econômico e da urbanização da população. Por essa razão, em 1954, o governo japonês promulgou a Lei de Limpeza Pública, que definiu as obrigações dos governos nacional e locais para assegurar apoio financeiro e tecnológico às prefeituras e as obrigações dos moradores, em cooperação com as prefeituras, na coleta e disposição de lixo (JAPAN, 2014).

Adicionalmente, em 1963, foi promulgada a Lei de Medidas Emergenciais Relativa ao Desenvolvimento de Plantas Ambientais. Nessa lei, o governo japonês formulou um plano quinquenal para a criação de plantas ambientais visando estabelecer políticas de criação de plantas de gestão de resíduos, que incluíam plantas de incineração, introduzindo plantas de incineração nas cidades do país (JAPAN, 2014). O processo continuou a crescer e, em 1994, com mais da metade da população vivendo em áreas urbanas e com densidade maior que dez mil pessoas por milha quadrada, o Japão incinerou quase 75% dos seus resíduos (CLARK, 2003).

Não obstante países com falta de espaço como o Japão tenham continuamente aumentado a quantidade de resíduos incinerados, tais tipos de plantas sempre receberam oposição, principalmente no que se refere à poluição do ar. No Reino Unido, na década de 1910, foram as reclamações sobre a poluição do ar que barraram a primeira expansão das plantas de incineração. Também foi a reclamação que segurou a segunda expansão, na década de 1960, e mesmo mais recentemente, na década de 1990, quando as principais preocupações diziam respeito às dioxinas e furanos.

Entretanto, as novas tecnologias de melhorias na eficiência da queima e no tratamento dos gases efluentes têm modificado significativamente o perfil das plantas incineradoras. Para que a indústria moderna se diferencie das antigas incineradoras sujas, foram criados dois termos comumente usados: *Energy from Waste* (EFW) (HOWES; WARREN 2015), e *Waste-to-Energy* (REIMANN, 2012).

Nas plantas atuais, quase metade da área é dedicada ao tratamento de gases e líquidos, como se pode conferir na figura abaixo, o que, aliado à queima mais eficiente, leva à redução substancial das emissões. Na Suécia, desde os anos 1980 essa redução chegou (dependendo dos componentes) a alcançar um nível entre 90 e 99% (AVFALL SVERIGE, 2009).

Figura 2 – Planta esquemática de uma Usina de Reciclagem Energética

Fonte: Silva (2015).

Segundo Michael Weltzin (2010), desde a década de 1990, para cada 100 mil toneladas tratadas, as emissões de NO_x caíram de 210 mil para 36 mil toneladas; as emissões de SO_2 caíram de 410 mil para 0,9 toneladas; as emissões de cádmio reduziram de 180 kg para 1,2 kg; as de mercúrio reduziram de 130 kg para 1,2 kg; as dioxinas caíram de 6g para 0,003g. Portanto, desde a virada do século XX para o século XXI, alguns países começaram a construir plantas modernas de *Waste-to-Energy*.

O Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), por exemplo, no seu relatório *Towards Green Economy* (UNEP, 2011), apoia as quotas de recuperação energética de resíduos na Coreia que estabeleceu uma meta de 3,17% (2013) e 4,16 (2020) para geração de energia a partir de resíduos e biomassa. De acordo com o relatório, até 2020 o país planeja converter todas as plantas de tratamento de resíduos em plantas de recuperação energética, esperando uma redução de 44,82 milhões de toneladas de gases efeito estufa em 2020.

As plantas *Waste-to-Energy* podem gerar energia de diversas formas. Nos Estados Unidos, onde existem cerca de 80 plantas em operação, cerca de 74% produz apenas eletricidade, que é vendida à rede; 5% gera vapor; e 21% produz tanto eletricidade como vapor (cogeração ou CHP). No país, há também diversas rotas tecnológicas. Embora a maioria (cerca de 76%) use a rota *Mass Burning*, que dispensa pré-tratamento, há outras rotas como aquelas (15%) que usam pré-tratamento que transformam em *Refused Derived Fuel* (RDF) e ainda 8% que usam *Module Combustion*, similar ao *Mass Burning*, mas em módulos pré-fabricados (MICHAELS, 2014).

Em 2007, na Europa, de acordo com a Associação Sueca de Gestão de Resíduos (AVFALL SVERIGE, 2009), cerca de 50 milhões de toneladas de resíduos foram processadas em plantas *Waste-to Energy*. A quantidade de energia gerada corresponde à necessidade de aquecimento das populações da Suécia, Noruega, Islândia, Dinamarca, Estônia, Letônia e Lituânia no mesmo ano.

Uma das principais causas desse nível alto de recuperação energética, de acordo com a Agência Europeia de Meio Ambiente (EEA), foi a Diretiva Europeia de Aterros (Directive 1999/31/EC), estabelecida em 1999, e focada na Hierarquia Europeia de Resíduos, cujas motivações eram: a crescente conscientização dos impactos ambientais dos aterros, como a emissão de metano e outros gases, contaminação de águas subterrâneas, corpos d'água e contaminação do solo. Nesse sentido, a Diretiva estabeleceu metas de redução de aterramento (EEA, 2009).

Não obstante, países da União Europeia têm estratégias diferentes para alcançar as metas, a Suécia optou por dividir o esforço entre reciclagem e recuperação energética de resíduos por incineração. A incineração teve grande tradição no país. Basicamente, segundo a Associação Sueca de Resíduos (AVFALL SVERIGE, 2009), a moderna estação de incineração de resíduos (*Waste-to-Energy*) tem a seguinte composição:

- a) recepção, pesagem e checagem da qualidade dos resíduos;
- b) um guindaste de alimentação que mistura o resíduo e o deposita no funil que leva o resíduo ao forno;
- c) o forno, com aproximadamente 1000°C de temperatura;

- d) o leito ou a grelha, onde toda a matéria combustível é queimada, permanecendo apenas a escória que, posteriormente, é transportada para ser separada e reciclada;
- e) longos dutos soldados ligados aos fornos, os quais podem alcançar dezenas de quilômetros, onde a água é circulada, aquecida e, fervida, se torna vapor. Quanto maior a temperatura, maior a pressão e maior a capacidade de geração elétrica. Por outro lado, quanto maior a temperatura e a pressão, maior o risco de corrosão e os custos de manutenção;
- f) sistemas de produção de eletricidade, recuperação de calor e “produção de frio”, que aproveitam a alta temperatura e pressão do vapor;
- g) turbina, onde a pressão do vapor é transformada em eletricidade;
- h) trocador calor, onde o calor é transferido do vapor para a água do sistema, depois de passar pela turbina, aproveitando o calor residual que pode ser usado para *District Heating*, onde a temperatura da água varia entre 70 a 120°C;
- i) sistema fechado de água, já que a água retorna para ser aquecida de novo;
- j) sistema de controle de emissões, onde os gases efluentes passam por um precipitador eletrostático onde a maioria das partículas são removidas. Dentro do equipamento eletrodos carregam cargas negativas às partículas que ficam presas nas placas de metais com carga positiva. Posteriormente, as placas são agitadas para soltar a poeira que depois é recolhida e armazenada em silos;
- k) *scrubbers*, onde posteriormente, os gases são lavados. A água possui substâncias, como cal, que reagem com as substâncias contidas no gás, limpando-o. O primeiro *scrubber* limpa metais pesados e substâncias ácidas; o segundo remove dióxido de enxofre; e o terceiro condensa outras misturas;
- l) o estágio final do processo de limpeza é o conversor catalítico que remove óxido de nitrogênio, da mesma forma que se faz em um cano de escape de um automóvel: o gás passa por uma cerâmica porosa com amônia solúvel e água. No processo, o tóxico óxido de nitrogênio se transforma em gás nitrogênio que compõe a maior parte da atmosfera terrestre;
- m) o gás resultante que flui para a chaminé é basicamente dióxido de carbono, nitrogênio e vapor d’água.

A descrição acima retrata a rota mais comum de tratamento térmico para resíduos sólidos urbanos, conhecida por *Mass Burning* ou *Grate-fired*. Sistemas de incineração *Fluidized Bed* (leito fluidizado) e sistemas de *Refuse Derived Fuel* (RDF) (combustível derivado de resíduo ou CDR) são menos comuns. Normalmente, num processo *Fluidized Bed*, um pré-tratamento é necessário (SABBAS *et al.*, 2003). Neste processo é usado um leito de areia, pó de combustão, ou qualquer material parecido com areia, suspenso num fluxo de ar para cima, aumentando a capacidade de combustão, promovendo uma eficiente transferência de calor e uma mistura uniforme por causa da alta turbulência criada pelo material suspenso (VAN CANEGHEM *et al.*, 2012).

Há três tipos de reatores de leito fluidizado (*Fluidized Bed*) para tratamento de resíduos: o borbulhante *Fluidized Bed* (BFBC), o *Fluidized Bed* rotativo (RFBC) e o *Circulating Fluidized Bed* (CFBC) externo. No Sistema borbulhante (BFBC), um leito inicialmente estacionário entra em movimento fluido pelo ar. O BFBC é usado para diversos combustíveis, como carvão bio-sólido, resíduos sólidos de plástico e lodo de estação de tratamento de esgotos.

As partículas coletadas no ciclone primário em parte retornam ao leito para alcançar um alto nível de queima. Em sistemas de leitos fluidizados externos (CFBCs), altas velocidades do gás são empregadas, os sólidos são continuamente carregados para fora da fornalha e partículas são separadas num ciclone externo (VAN CANEGHEM *et al.*, 2012).

2.1.3 Outras rotas térmicas

Há outros tratamentos térmicos com recuperação de energia. A Pirólise, por sua definição, é a decomposição térmica na ausência de elementos oxidantes. É o primeiro estágio da gaseificação e da combustão antes da oxidação. O produto final é o bio-óleo, que é líquido e, portanto, tem as vantagens dos combustíveis líquidos, mas tem aproximadamente a metade do poder calorífico do óleo convencional (BURANI *et al.*, 2003).

Gaseificação é o processo térmico no qual o oxigênio é adicionado em proporção abaixo da estequiométrica aos materiais sólidos, causando reações parcialmente oxidantes. Em altas temperaturas, as ligações das longas cadeias moleculares da matéria sólida são quebradas para obter pequenas moléculas na forma gasosa (*syngas*) que ainda possui conteúdo energético,

presente nos componentes parcialmente oxidados e pequenos hidrocarbonetos (LOMBARDI; CARNEVALE; CORTI, 2012).

A gaseificação pode ser encontrada nos passos intermediários entre a pirólise (agente menos oxidado) e a combustão (excesso de oxidação). No que se refere ao desenho do leito, os gaseificadores se dividem em: a) *Fixed Bed*; b) *Fluidized Bed*; c) *Entrained Flow*. O *Fixed Bed* também pode ser dividido em: *updraft*, *downdraft* e *cross-draft*, já o *Fluidized Bed* pode ser dividido em estacionário (*bubbling*) *Fluidized Bed Gasifier*, *Circulating Fluidized Bed* e *Circulating Fluidized Two-Bed Gasifier* (HRBEK, 2016),

A composição do gás e o nível de componentes indesejáveis (alcatrão, poeira, cinzas, nitrogênio, cloro e enxofre), produzidos durante a gaseificação da biomassa dependem de vários fatores como: composição da matéria-prima, tipo de reator e parâmetros operacionais. Dependendo da utilização do gás, contaminantes precisam ser removidos para alcançar a qualidade requerida, o que deve ser feito de acordo com o sistema de conversão (HRBEK, 2016).

Há, entretanto, inovações como o uso de Plasma (tocha ou arco) nos sistemas de gaseificação. Plasma consiste em um gás ionizado formado quando uma descarga elétrica passa por um gás. Durante a gaseificação com Plasma, os gases quentes entram em contato com o material combustível aquecendo-o a mais de 1600°C, quebrando as ligações químicas do material orgânico convertendo-o nos elementos básicos que consistem o gás de síntese (syngas), enquanto os materiais inorgânicos são derretidos e fundidos num material não perigoso, parecido com uma escória vitrificada que pode ser usada na indústria de construção civil. Entre as vantagens da tecnologia estão o melhor rendimento energético e a capacidade de tratar resíduos misturados ou mesmo perigosos, sem gerar subprodutos tóxicos (GLOBAL SYNGAS, 2017). Entretanto, os custos altos ainda são um desafio.

2.1.4 District Heating

Um importante conceito para entender o sistema sueco de aproveitamento energético de resíduos é o *District Heating*. Em países de clima temperado, há grande demanda por calor para residências. Apesar dos avanços alcançados na eficiência dos sistemas modernos de calefação, por meio de *District Heating* e *Heat Pumps* entre outros, aproximadamente metade do consumo energético dos setores residencial e de serviços ainda é devido à demanda de aquecimento (SWEDISH ENERGY AGENCY, 2015).

Em termos de aquecimento urbano as populações europeias tiveram sempre que encontrar soluções para evitar o clima frio dentro de casa, numa longa história que começa com as fogueiras, passa pelos sofisticados sistemas grego e romano de aquecimento com fornalhas subterrâneas até chegar nas lareiras. Conforme as tecnologias avançaram, mais e mais sofisticadas soluções eram buscadas (BEAN; OLESEN; KIM, 2010).

No início, cada residência tinha o seu próprio sistema de aquecimento. Mesmo hoje há representações das casas com uma chaminé, o que retrata uma residência que precisava de sua própria solução de aquecimento. Não obstante, as cidades foram ficando maiores e mais concentradas. O primeiro combustível, a madeira, se tornou menos disponível, passando-se a usar carvão mineral. Porém, as emissões das chaminés e as emissões das indústrias se transformaram em poluição crítica.

Quando o petróleo se tornou o principal combustível, os arranha-céus também começaram a modificar o perfil das cidades. As soluções individuais, além de causarem poluição, incorriam em outro risco: incêndios, que se tornavam ainda mais perigosos com arranha-céus. Para evitar essas soluções individuais, criou-se o conceito de *District Heating*. Segundo a International District Heating Association (1983), os conceitos de *District Heating* e *District Cooling* podem ser descritos como um método no qual a energia térmica de uma fonte central é distribuída para consumidores, sejam eles residenciais, comerciais ou industriais, para uso em aquecimento ou esfriamento do espaço, aquecimento de água ou calor de processo.

As primeiras experiências ocorreram no Estado de Nova York, nos anos 1880, e basicamente todos os sistemas instalados até 1930 usavam vapor. Posteriormente, outras técnicas mais seguras de distribuição do calor central foram usadas (LUND *et al.*, 2014).

As redes modernas de *Distric Heating* exigem uso de fontes de calor de baixo custo e sua evolução econômica depende de assegurar a interconectibilidade de sistemas menores. Um padrão único para diferentes redes pode facilitar a integração de sistemas, aumentando as oportunidades de integração e ganho de escala econômica (GREATER LONDON AUTHORITY, 2013).

Sistemas *District Heating* são considerados essenciais, de acordo com a Comissão Europeia (EUROPEAN COMMISSION, 2011), para que o continente alcance segurança energética com energia competitiva e sustentável. A técnica é listada como medida de eficiência energética.

2.1.5 Produção de Eletricidade

O resíduo sólido urbano é um combustível pouco homogêneo, o que o torna difícil para plantas termelétricas operarem. Portanto, deixá-lo mais homogêneo é importante para melhorar a eficiência na geração elétrica, em termos de disponibilidade e constância na capacidade. Por essa razão, a separação de resíduos é também importante para plantas termelétricas que produzem eletricidade a partir de resíduos. Se os moradores separam os resíduos, a eficiência elétrica das térmicas aumenta (BYMAN, 2016).

Não obstante, a tecnologia mais comum para a incineração de lixo é o *Mass Burning*, ou *Grate-fired*, que é mais adequado para tratar resíduos menos homogêneos. Se os resíduos são mais bem separados e relativamente homogêneos, leitos fluidizados (*Fluidized Bed*) podem ser utilizados (BYMAN, 2016).

Uma vez que lixo é gerado durante todo o ano e deve ser tratado de forma relativamente rápida, as plantas de cogeração (CHP) de resíduos devem funcionar na base com cerca de 7 mil horas de carga. Novas tecnologias de empacotamento de resíduos estão permitindo que se armazene resíduos para quando a demanda estiver alta (BYMAN, 2016).

2.1.6 Experiências Externas

Segundo Howes and Warren (2015), a geração energética a partir de resíduos é reconhecida como uma das principais formas de bioenergia comercialmente disponíveis. Embora essa forma de geração elétrica tenha uma alta taxa de crescimento, ela não é uniforme entre os países. Enquanto alguns países investem pesado na tecnologia, outros, não performam da mesma forma.

Segundo os autores, a recuperação energética de resíduos tende a ser adotada em países com políticas de gestão de resíduos sofisticadas e normalmente é motivada por um desejo de diminuir a quantidade de resíduos em aterros. Mas em alguns casos, lembram os autores, a iniciativa é motivada por altos custos da terra e/ou necessidade de energia alternativa de baixo custo. Na Figura 3, podemos ver a porcentagem de resíduos incinerados por país em março de 2011.

Figura 3 – Porcentagem de resíduos incinerados

Fonte: Howes; Warren (2015).

Quando os autores consideram países com políticas de gestão de resíduos “sofisticadas”, eles também se referem a países que se movem para cima na Hierarquia de Resíduos. Nesses casos, o índice de reciclagem de resíduos é também uma referência.

No que diz respeito à correlação de uso de recuperação energética e de reciclagem, ela também é positiva, como se pode observar na Figura 4. Os países com alta taxa de reciclagem - como Áustria, Alemanha, e Suíça - são também os países que mais recuperam a energia de resíduos, enquanto os países que menos reciclam - como Romênia, Turquia e Brasil - são os que menos recuperam energia e mais aterram.

Figura 4 – Destinação de resíduos em alguns países

Fonte: Michaels (2014).

Os países com maior porcentagem de resíduos usados como combustível são europeus – sete dos dez países com maior porcentagem de resíduos tratados com recuperação energética ficam na Europa (AVFALL SVERIGE, 2009), embora, em termos absolutos, os países com maior quantidade de resíduos tratados com recuperação energética sejam asiáticos.

Os incineradores se espalharam rapidamente entre os países da Ásia Oriental, países populosos que produzem grande quantidade de resíduos e têm limitadas (ou distantes) áreas para aterramento. Além do Japão, que trata mais de 61% dos seus resíduos termicamente, com recuperação energética, na China, essa modalidade de tratamento já ultrapassou 17% dos resíduos (THEMELIS; MUSSCHE, 2013).

Outros países, como Taiwan (mais de 50%) e Cingapura (mais de 40%), também destinam grande quantidade de resíduos para recuperar sua energia. É na Ásia que está a grande maioria de incineradoras. De acordo com a Avfall Sverige (2009), já na década passada havia mais de dois mil incineradoras no continente, enquanto havia 460 na Europa, 100 na América do Norte e apenas dez nos demais continentes.

2.2 DIGESTÃO ANAERÓBICA E BIOGÁS

Biogás é o gás resultante da decomposição de material orgânico por microrganismos num ambiente livre de oxigênio, cujo processo é chamado de digestão anaeróbica. Nesse processo, diferentes microrganismos decompõem complexos compostos orgânicos, como carboidratos, gorduras e proteínas, num processo que gera metano e dióxido de carbono.

Embora esse processo ocorra naturalmente em ambientes com limitado acesso ao oxigênio, como pântanos e estômagos de ruminantes, pode ser reproduzido numa planta de digestão anaeróbica, onde o material orgânico, por exemplo, lodo de esgotos, esterco, colheitas e restos de alimentos, podem ser processados, possibilitando a produção, armazenamento e utilização do gás como matéria-prima ou energia.

Nesse processo, o substrato é colocado ou bombeado num recipiente ou câmara sem ar (reator). O biogás resultante é formado basicamente de metano e dióxido de carbono, mas também possui certa quantidade de compostos de nitrogênio, enxofre e amônia. O biogás não tratado também é saturado de vapor de água. Além desses gases, a digestão anaeróbica produz um resíduo rico em nutrientes que pode ser usado como fertilizante (ENERGIGAS SVERIGE, 2011).

O metano oriundo de matéria orgânica residual pode substituir o metano fóssil armazenado em outras eras geológicas, evitando emissões novas. Assim, substituir o metano fóssil por metano da digestão anaeróbica, evita emissões, já que as moléculas de dióxido de carbono resultantes da queima desse metano fazem parte do ciclo atual de carbono. Além disso, a digestão anaeróbica contribui para evitar poluição no solo, corpos d'água e transforma material perigoso em recursos energéticos e materiais (ANEEL, 2009).

Portanto, de acordo com Al Seadi *et al.* (2008), o biogás beneficia a sociedade, pois consiste numa fonte de energia renovável, reduzindo assim as emissões de gás efeito estufa e também a dependência em combustíveis fósseis importados, contribuindo para as metas energéticas e ambientais, reduzindo resíduos, criando empregos, tornando o uso energético mais flexível e eficiente, melhorando a gestão de resíduos, produzindo fertilizantes renováveis entre outras. Em suma, o metano da digestão anaeróbica poderia tomar o lugar do metano fóssil com várias vantagens.

Entretanto, existem certas diferenças entre o biogás e o gás natural fóssil. A maior de todas se refere ao conteúdo de dióxido de carbono. Enquanto o dióxido de carbono é um dos principais componentes do biogás, o gás natural possui baixas taxas desse gás. Além disso, gás natural possui uma certa quantidade de outros hidrocarbonetos, como propano, etano e butano, que o biogás não possui. Essas duas diferenças resultam numa quantidade menor de energia por unidade volumétrica do biogás, comparado com o gás natural (PETERSSON; WELLINGER, 2009).

Uma vez que a matéria-prima do biogás é composta de resíduos, o uso do biogás pode produzir energia e aquecimento com as vantagens mencionadas. Entretanto, para substituir o gás natural na rede e motores, são necessários tratamento e purificação do biogás para separar dióxido de carbono e outros compostos que tornam o biogás diferente do gás natural. A Tabela 1 mostra a diferença entre os gases (PETERSSON; WELLINGER, 2009):

Tabela 1 – Composição do biogás, gás de aterro e gás natural

	Biogás	Gás de aterro	Gás natural (Dinamarquês)*	Gás natural (Holandês)*
Metano (vol.– %)	60 –70	35–65	89	81
Outros hidrocarbonetos (vol.– %)	0	0	9.4	3,5
Hidrogênio (vol.– %)	0	0-3	0	–
Dióxido de carbono (vol.– %)	30– 40	15–50	0.67	1
Nitrogênio (vol.– %)	~0.2	5 – 40	0.28	14
Oxigênio (vol.– %)	0	0-5	0	0
Sulfeto de Hidrogênio (ppm)	0–4000	0 –100	2.9	–
Amônia (ppm)	~100	~ 5	0	–
Lower heating value (kWh/Nm ³)	6.5	4.4	11.0	8.8

*Média durante 2007 (Energinet.dk)

Fonte: Petersson; Wellinger (2009).

Portanto, o biogás precisa de um processo de purificação para assegurar que possa substituir o gás natural em todos os seus usos. A fim de criar uma distinção entre o biogás sem tratamento e o purificado, foi criado o conceito de biometano. De acordo com Strauch *et al.* (2013), biometano é o substituto de gás natural a partir de biomassa renovável. Uma vez que o biogás sem tratamento não pode substituir o gás fóssil em todas as suas utilidades, o biometano é o biogás purificado que pode fazer esse papel.

De acordo com Chaemchuen, Zhou e Verpoort (2016), os dois maiores passos para transformar o biogás em biometano ou biocombustível são a limpeza do biogás para remover impurezas seguido de purificação do biogás para ajustar o valor calorífico por meio da separação do CO₂ do CH₄. O primeiro passo trata dos contaminantes do biogás. O segundo, remove o excesso de dióxido de carbono, aumentando a fração de metano: é o chamado processo de upgrade.

2.2.1 Processo de purificação do biogás

Ainda segundo Chaemchuen, Zhou e Verpoort (2016), os métodos de purificação podem ser divididos em duas categorias: a) a remoção física, que depende da temperatura e pressão; b) a remoção química em que a separação depende da reação de neutralização ácido-base. Também pode ser dividida em métodos de sorção e separação.

O termo sorção é um termo geral para processos de absorção (átomos, moléculas ou mesmo íons entram num certo reservatório dentro dos materiais) ou de adsorção (átomos, moléculas ou íons aderem à uma superfície e criam uma camada na superfície do adsorvente). As metodologias de sorção também podem ser divididas em duas categorias: a) baseada em temperatura e pressão (física); b) baseada na reação de neutralização ácido-base.

Por outro lado, o termo separação é comumente utilizado referindo-se às tecnologias de membrana que separam substâncias em duas frações usando membranas. Especificamente, há várias tecnologias comercialmente disponíveis para separar o dióxido de carbono do metano, purificando o gás e aumentando o seu potencial calorífico. Algumas rotas têm destaque: a absorção, a adsorção, membranas e a separação criogênica.

2.2.1.1 Absorção

Processos de absorção podem remover tanto dióxido de carbono quanto sulfeto de hidrogênio. As diferentes forças de ligação entre os mais polarizados CO_2 ou H_2S e o pouco polarizado metano são usadas para separar os compostos. O método mais popular de absorção é chamado *Pressurized Water Scrubbing* (PWS), no qual o biogás é comprimido e injetado na parte de baixo de uma coluna onde ele encontra uma corrente de água no contra fluxo.

Tanto o dióxido de carbono quanto o sulfeto de hidrogênio são mais solúveis em água que o metano. No topo da coluna, sai um biogás enriquecido, mas saturado de vapor d'água. Para reduzir a água, é preciso secá-lo. Do outro lado, o dióxido de carbono sai com a água e num tanque a pressão é diminuída e a maior parte do dióxido de carbono é emitido. O sulfeto de hidrogênio pode criar problemas de emissão e pode ser tratado separadamente (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

No lugar de água, solventes orgânicos podem ser usados. A principal diferença é que o dióxido de carbono e o sulfeto de hidrogênio são mais solúveis em solventes orgânicos, o que demanda menor circulação de líquido para a mesma quantidade de produção de gás. Solventes como glicol polietileno têm a vantagem de separar água e hidrocarbonetos halogenados. Como desvantagem há a necessidade de energia para recuperar o solvente orgânico do sulfeto de hidrogênio. Outros solventes como as alcanolaminas também podem ser usadas (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

2.2.1.2 Pressure Swing Adsorption

Entre as técnicas de adsorção, a mais usada é a *Pressure Swing Adsorption* (PSA), que separa os gases por meio do tamanho da dimensão da molécula e de sua capacidade de ficar retido no material de adsorção. O biogás é injetado em fluxo ascendente numa coluna de adsorção, na qual ficam retidas as moléculas de CO₂, O₂ e N₂, e comumente é usado em duas fases de modo que, ao fim das colunas, o gás tem uma fração de 95-99% de metano (KHAN *et al.*, 2017).

No PSA, a adsorção ocorre em alta pressão, e o material regenera por meio da redução da pressão. O sulfeto de hidrogênio precisa ser pré-separado num tanque adicional com carvão ativado antes de o gás ser injetado embaixo da coluna de adsorção. Nas colunas pressurizadas, o dióxido de carbono é adsorvido, e o metano segue para o topo da coluna. Quando saturado, o biogás passa para outra coluna. São várias colunas ligadas em cadeia. Isso cria uma operação contínua e reduz a necessidade de compressão do gás. A regeneração se dá pela despressurização, e o gás capturado com dióxido de carbono ainda possui metano, portanto é reciclado e volta ao ciclo (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

2.2.1.3 Separação por membrana

No que se refere à separação por membranas, o conceito é simples: alguns componentes são transportados através de uma membrana fina enquanto outros permanecem retidos. Não obstante, existem diferentes processos de separação por membrana: pode ser separação com fase gasosa em ambos os lados da membrana ou um sistema de absorção gás-líquido, com uso de amina, por exemplo. Nesse caso, não é necessária alta pressão, mas aproximadamente a pressão atmosférica (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

Por outro lado, membranas com fases gasosas em ambos os lados também são chamadas membranas secas. Essas membranas trabalham tanto com alta pressão de mais de 20 bar quanto com pressões menores de 8 a 10 bar. A separação se deve ao fato de as moléculas terem diferentes tamanhos e permeabilidade através da membrana. Também a diferença de pressão entre os dois lados é crítica para a separação (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

Enquanto o dióxido de carbono e o sulfeto de hidrogênio passam pela membrana, ao lado permeável, o metano fica retido. Algum metano passa pela membrana. Uma vez que alto nível de purificação só pode ser alcançado com plantas de larga escala ou uma série de membranas, uma considerável perda de metano pode ocorrer. Essa perda pode ser aproveitada numa planta de cogeração para gerar energia para o processo de purificação (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

2.2.1.4 Separação criogênica e outras possibilidades

A separação criogênica é baseada no princípio de que os gases liquefazem sob diferentes condições de temperatura e pressão. Ela é operada sob temperatura muito baixa (-170°C) e alta pressão (80 bar). O ponto de ebulição do CH_4 a 1 atm é -161.5°C , muito menor do que o do CO_2 que é -78.2°C , o que possibilita a separação do CO_2 e do CH_4 pela liquefação. Porém, as condições operacionais são mantidas por uma série de compressores e trocadores de calor, o que aumenta o capital e o custo operacional utilizado. Esses são os principais problemas da solução aliados ao uso intensivo de energia (KHAN *et al.*, 2017).

Outra possibilidade é a purificação no local de produção de biogás ou “*In-situ Methane Enrichment*”. Nesse método, o lodo da câmara de digestão é levado a uma coluna onde ele encontra um fluxo de ar. O dióxido de carbono que é dissolvido na matéria orgânica é removido, e o lodo volta para a câmara de digestão, onde mais dióxido de carbono é removido, resultando em um gás enriquecido na câmara (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

Além disso, há a conversão biológica do CO₂. Purificação biosintética de biogás é o nome do processo em que a microalga Eukaryotic e a cianobactéria Prokaryotic (comumente conhecida como microalga) convertem o CO₂ presente no biogás em biomassa de microalga que depois pode ser convertido em metano (MUÑOZ *et al.*, 2015).

2.2.1.5 Contaminantes típicos do biogás

Além de aumentar o poder calorífico do biogás, é necessário remover os contaminantes que podem prejudicar equipamentos ou representar um problema à saúde. Existem alguns típicos contaminantes no biogás que precisam ser removidos. Portanto, além de remover dióxido de carbono, é necessário remover água, sulfeto de hidrogênio, nitrogênio, oxigênio, amônia, siloxanos e material particulado.

As concentrações de impurezas variam de acordo com o substrato a partir do qual o biogás foi produzido. Alguns desses compostos podem ser separados com a mesma tecnologia que remove o dióxido de carbono. Contudo, para evitar corrosão e o desgaste mecânico do equipamento de purificação, algumas vezes é preciso limpar o gás antes da purificação (PETERSSON; WELLINGER, 2009).

O biogás, em especial o gerado a partir de gás de aterro, pode conter uma variedade de compostos de enxofre, que devem ser evitados para não ocorrer corrosão em compressores, tanques de armazenamento e motores. Existem vários compostos de enxofres, por exemplo, sulfetos, dissulfetos e tióis. Compostos oxidados do enxofre (sulfato e sulfito) são bastante corrosivos na presença de água. O composto de enxofre mais comum é o sulfeto de hidrogênio, reativo à maioria dos metais, cuja reatividade é agravada por concentração, pressão e presença de água e elevadas temperaturas (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

Os compostos halogenados são outros contaminantes que combinam um ou mais elementos químicos que incluem um halogeno – grupo da tabela periódica que inclui fluor (F), cloro (Cl), bromo (Br), iodo (I), e astatínio (At). Halogêneos são oxidados durante processos de combustão e o seu produto é corrosivo, especialmente na presença de água e também, em determinadas condições, podem formar dioxinas e furanos.

Os halogêneos são compostos principalmente presentes em gás de aterro, mas dificilmente encontrados em gás de lodo de esgoto ou resíduos orgânicos. A maior parte dos compostos halogenados do gás de aterro é resultado da volatilização direta de componentes de resíduos sólidos como os clorofluorcarbonos (CFCs), que eram largamente usados em refrigerantes, propelentes e espumas isolantes, e sua presença depende da pressão e vaporização sob as condições do aterro (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

Já os siloxanos são voláteis de silício ligados por radicais orgânicos. Eles ocorrem tanto em gás de aterro como em gás a partir de lodo de tratamento de esgotos. São originários principalmente de diferentes tipos de produtos como xampus, detergentes e cosméticos. Durante a combustão do gás com siloxanos, estes são convertidos em partículas inorgânicas de sílica, que podem causar danos em motores, aparelhos e equipamentos como válvulas, cilindros, paredes e revestimentos.

Portanto, a quantidade de sílica precisa ser reduzida ao mínimo, especialmente em motores, em que também demanda troca de óleo mais frequentemente. O crescente uso de cosméticos e outros produtos contendo sílica pode implicar maior monitoramento do gás combustível (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

Altas concentrações de amônia são outro problema para motores a gás. O limite de concentração é constantemente estabelecido por fabricantes de motores que, normalmente, consideram o limite de 100 mg/Nm³. A queima de amônia também leva à formação de óxido nitroso – NO_x (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

A água que satura o biogás ao sair do digestor, caso não removida, também é um contaminante que pode condensar nos dutos e causar corrosão. A remoção dessa água pode ser por: resfriamento, compressão, absorção e adsorção. Ao aumentar a pressão e reduzir a temperatura, a água irá condensar e será assim removida do biogás.

Alguns métodos simples, como aterrar os dutos de gás e um recipiente para retenção do condensado pode ser efetivo, mas a água pode ser removida por adsorção usando SiO_2 , carvão ativado ou peneiras moleculares, que regeneram com mudanças de temperatura e pressão. Pode ser feita também por absorção em soluções glicol ou sais higroscópicos (PETERSSON; WELLINGER, 2009).

Poeira e partículas também danificam motores e devem ser removidas com algum tipo de filtro e/ou ciclone para reduzir a quantidade de partículas no gás. Filtros, além das partículas, reduzem a quantidade de gotículas de água e óleo.

2.2.2 Remoção de contaminantes

Os processos mais comuns de purificar o biogás – *Water Scrubbing* e *Pressure Swing Adsorption* (PSA) – alcançam mais de 96% de conteúdo de metano, sem usar qualquer outro químico, no entanto, além disso, removem outros compostos. *Water Scrubbing* também remove compostos halogenados, compostos de enxofre. Contudo, para remover compostos insolúveis em água – incluindo-se compostos orgânicos de silício – outras tecnologias precisam ser usadas (RASI; LÄNTELÄ; RINTALA, 2011).

Uma das principais preocupações dos produtores de biometano é o sulfeto de hidrogênio, que é formado no processo de redução microbiológica das proteínas e outros materiais que contêm enxofre. As concentrações de sulfeto de hidrogênio podem ser reduzidas por precipitação ou por tratamento usando equipamento específico ou no processo de redução de dióxido de carbono. Como sulfeto de enxofre é altamente corrosivo, é recomendável que seja removido nas primeiras fases da purificação do biogás. Uma das formas mais comuns de redução do sulfeto de enxofre ocorre ainda na biodigestão, dosando cloreto de ferro no lodo para ser digerido ou ar/oxigênio no digestor (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006; PETERSSON; WELLINGER, 2009).

Também existe o tratamento biotecnológico, no qual microrganismos, como a família do *Thiobacillus* (e *Sulfolobus*), podem ser usados para reduzir os níveis de sulfeto no biogás, convertendo-o em enxofre elementar e algum sulfato. Alguns desses microrganismos são comumente encontrados nos materiais de digestão, portanto não precisam ser inoculados. Além disso, a maioria é autotrófica e usa o dióxido de carbono como fonte de carbono. Neste caso, um pouco de oxigênio precisa ser adicionado no processo, num montante estequiométrico, dependendo dos níveis de sulfeto de hidrogênio, usualmente entre 2–6 % de ar (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

O método mais simples é a adição de oxigênio diretamente na câmara de digestão. Espera-se que esse método reduza o sulfeto de hidrogênio em mais de 95 %, trazendo-o para níveis de menores que 50 ppm, embora haja vários fatores que afetam o rendimento da redução, como temperatura, lugar e quantidade de ar e tempo de reação. Medidas de segurança devem ser tomadas para evitar uma dose excessiva de ar no caso de uma falha de bombeamento, já que o metano é explosivo num volume entre 5–15% de ar (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

O processo pode ser facilitado com a imobilização de microrganismos no substrato por meio de filtro biológico para retê-los na saída do digestor. O biogás com ar adicionado encontra um contra fluxo com água e nutrientes. Quando o pH cai a certo nível, a solução contendo enxofre é removida e substituída (PETERSSON; WELLINGER, 2009).

Outra dessulfurização biológica pode ser realizada num biofiltro separado, com suportes plásticos que contenham microrganismos dessulfurizantes. O gás fluindo para cima encontra um contra fluxo de um líquido de gás condensado e líquido da lama ou uma solução de minerais (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

Um método recente de remoção do sulfeto de hidrogênio usa a precipitação para removê-los. Para tanto se adiciona íons metálicos, comumente Fe^{2+} ou Fe^{3+} (como FeCl_2 , FeCl_3 ou FeSO_4), no digestor. O metal com enxofre precipita quase que imediatamente, é recuperado pelo oxigênio e produz dióxido de enxofre, que pode ser usado como matéria-prima para ácido sulfúrico ou gesso. O processo é capaz de limpar o biogás para um gás com menos de 1 ppm de sulfeto de hidrogênio (PETERSSON; WELLINGER, 2009).

Existe também o método do uso de carvão ativado com poros de tamanhos definidos para adsorção na sua superfície interna. São usados permanganato ou iodeto de potássio (KI), carbonato de potássio (K_2CO_3) ou óxido de zinco (ZnO) como catalizadores para apressar a reação (PETERSSON; WELLINGER, 2009).

Pode-se também lavar o gás com hidróxido de sódio (NaOH), que é uma das mais antigas formas de limpeza do gás, mas é pouco aplicada atualmente em função da solução cáustica que requer grande técnica e precaução. Essa solução é atualmente usada somente em grandes quantidades de gás e altos níveis de concentração de H_2S .

Outra alternativa é absorvê-lo usando minerais ou lascas de madeira revestidos de óxido de ferro ($Fe(OH)_3$ ou Fe_2O_3). A regeneração é possível até a superfície ser toda coberta por enxofre natural, quando o material precisa ser renovado, por isso o processo deve ter duas torres onde uma produz e a outra reoxida. (PETERSSON; WELLINGER, 2009).

O sulfureto de hidrogênio também pode ser absorvido numa solução de quelato em que os íons Fe^{3+} são reduzidos aos íons Fe^{2+} , enquanto o sulfeto de hidrogênio é oxidado ao enxofre elementar. A solução é regenerada num segundo vaso por adição de oxigênio e água. É mais adequado para cargas elevadas e geralmente não é aplicado em plantas de biogás (PETERSSON; WELLINGER, 2009).

Oxigênio e nitrogênio normalmente não estariam presentes no biogás, a não ser que o ar ambiente seja aspirado ao sistema. Portanto, esses gases encontram-se principalmente no gás de aterro (com menos controle) sem a pressão necessária. Níveis pequenos de oxigênio no gás podem ser usados em plantas de cogeração ou caldeiras, mas não para outros usos que podem causar riscos de explosão. Esses gases podem ser removidos por carvão ativado, peneiras moleculares ou membranas e, de certo modo, podem ser removidos em processos de dessulfurização ou em processos de purificação, como PSA e membranas (PETERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006; PETERSSON; WELLINGER, 2009).

Degradação de proteínas em processos anaeróbicos forma amônia. A quantidade desse composto formado depende do substrato e do pH no digestor. Mas, em função da grande afinidade da amônia com a água, ela é comumente separada no processo de purificação durante a secagem do gás. Portanto, um processo de separação adicional normalmente não é necessário (PETERSSON; WELLINGER, 2009).

A remoção de siloxanos merece uma atenção especial, pois foi razão para que a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2014) postergasse a regulação da injeção de biometano nas redes de gás natural brasileiras. Embora o contaminante não tenha sido objeto de atenção especial na Suécia, no Brasil houve bastante cautela, especialmente por causa da grande produção de biogás de aterro.

Siloxanos são compostos com ligação de silício e oxigênio, usados em produtos de higiene pessoal, como desodorantes e xampus. Logo, podem ser encontrados em lodos de tratamento de esgotos e gás de aterro e devem ser removidos, uma vez que quando queimados podem formar óxidos de silício que podem danificar motores a gás (PETERSSON; WELLINGER, 2009).

Uma vez que são usados em produtos farmacêuticos e cosméticos, eles compartilham propriedades úteis como alta compressibilidade, baixa inflamabilidade, baixa tensão superficial e permeabilidade, alta estabilidade térmica, baixa toxicidade e biodegradabilidade. Os gases de aterro contêm concentrações significativas de siloxanos ($1\text{--}400\text{ mg m}^{-3}$) que devem ser removidos (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011).

Quando oxidados pela combustão, transformam-se em óxidos de silício que formam pequenos quartzos microcristalinos e podem causar danos na câmara de combustão, velas de ignição, válvulas, cilindros, desgastando a parte interna do motor. Fabricantes de motores afirmam que o limite máximo de siloxanos no gás pode variar de $0,03$ a 28 mg/m^3 .

Os siloxanos podem ser absorvidos quimicamente, uma vez que são convertidos em componentes de pouca volatilidade. Uma remoção de mais de 95% pode ser alcançada com uma solução de ácido sulfúrico de $480\text{ dm}^3\text{ m}^{-3}$ e uma solução de ácido nítrico $650\text{ dm}^3\text{ m}^{-3}$ e temperatura de 60°C . O uso de ácido, entretanto, precisa ser avaliado com cuidado em função do risco potencial à saúde e ao meio ambiente (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011).

Materiais adsorventes têm sido usados para remover siloxanos como leitos de polímero, adsorventes inorgânicos, adsorventes com carbono como principal componente. Uma vez que o biogás contém um amplo espectro de compostos em várias concentrações, a alta seletividade para os compostos de siloxanos são essenciais em função da competição entre os componentes que serão adsorvidos (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011).

Embora o uso de carvão ativado seja o método mais usado comercialmente para adsorção de siloxanos, experimentos com gel de sílica mostram que a adsorção por este material é maior que a do carvão ativado e, em larga escala, pode se tornar uma opção melhor e economicamente mais interessante para remover os siloxanos (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011). Uma razão para isso é que o carvão ativado nem sempre pode ser regenerado, portanto proporcionam custos adicionais para a disposição e para aquisição de novo carvão (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

Já o gel de sílica oferece uma regeneração de mais de 95%. A umidade tem um importante papel no processo, quanto mais umidade, menor a eficiência. Portanto, uma pré-secagem aumenta a taxa de remoção de siloxanos. Pressões elevadas em leitos de gel de sílica oferecem, ao mesmo tempo, secagem do gás e remoção significativa dos siloxanos (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011).

Outras técnicas de remoção de siloxanos podem ser: esfriamento do gás, alumínio ativado ou absorção em misturas líquidas de hidrocarbonetos, e pode ser removido simultaneamente com sulfeto de hidrogênio (PETERSSON; WELLINGER, 2009). Separação por membranas, como as membranas poli dimetil siloxana (PDMS), pode funcionar para separar siloxanos e outros compostos orgânicos gasosos. A sua permeabilidade por água também pode secar o gás (RYCKEBOSCH; DROUILLON; VERVAEREN, 2011).

Há também pesquisadores verificando o tratamento de metil siloxanos por meio de biodegradação aeróbica e anaeróbica. Apesar da percepção generalizada de que metil siloxanos não sejam biodegradáveis, microrganismos *Pseudomonas* são capazes de biodegradar hexametildimetilsiloxano e octametildimetilsiloxano (MUÑOZ *et al.*, 2015).

2.2.3 Experiências mundiais

O maior movimento coordenado para a redução de emissões de gases de efeito estufa está localizado na Europa. No continente, alguns países com vasta rede de distribuição de gás têm o biometano como essencial para alcançar as metas de redução estabelecidas. Em março de 2007, os líderes europeus estabeleceram uma política integrada de clima e energia, a chamada “meta 20-20-20”.

Essa política, em termos gerais, estabeleceu três metas que devem ser alcançadas até 2020. A primeira é a redução de 20% das emissões de gases de efeito estufa, comparando-se com os níveis de 1990. A segunda, a redução de 20% do consumo de energia; a terceira estabelece que 20% da energia total consumida seja produzida por energias renováveis. Em junho de 2009, essas diretivas se tornaram lei.

Nesse contexto, os europeus avançaram bastante na produção de biogás e biometano. O projeto *Green Gas Grid*, parceria que envolvia 13 instituições, entre agências nacionais, instituições científicas e associação de indústrias, verificou, em seu relatório final de 2014, os avanços da indústria, conforme resumido na Tabela 2:

Tabela 2 – Biogás e biometano na Europa

País	Plantas de biometano	Plantas de biometano alimentando a rede	Plantas de biogás	Agricultura	Resíduos	Esgoto	LFG
Áustria	10	7	503	aprox. 300	55	134	14
Croácia	1	0	12	9	0	2	1
França	3	3	269	40	98	60	71
Alemanha	140	138	9200	aprox. 7400	100	1700	
Hungria	1	0	58	36	0	14	8
Itália	2	0	1300	aprox. 1000	32	60	220
Holanda	23	23	130				
Polônia	0	0	219	30	2	aprox. 200	
Eslováquia	0	0	57	34	4	10	9
Reino Unido	4	4	360	60		100	>200
Suécia	47	11	242	26	26	135	55
Suíça	17	15	600	140		460	
Total	247	201	12950				

Fonte: Green Gas Grid Project (2014).

Alguns países decidiram utilizar o poder calorífico do biogás para substituir o mais problemático uso final dos combustíveis fósseis: o transporte. Segundo Yergin (2014), a adequação do petróleo ao setor de transporte foi essencial para a mudança de paradigma e ascensão do petróleo sobre o carvão. Como, a partir do século XX, a mobilidade se transformou em aspecto essencial na sociedade moderna, um dos principais desafios é substituir o petróleo como combustível veicular.

O transporte é o segundo setor energético com maiores emissões de gases de efeito estufa na União Europeia, responsável por um quarto das emissões do continente, atrás apenas do setor elétrico. Considerando apenas o transporte rodoviário, as emissões correspondem a um quinto das emissões. Enquanto todos os setores da União Europeia reduziram suas emissões, no período de 1990 a 2013, o setor de transporte cresceu 14 %. Embora a eficiência energética dos veículos tenha aumentado, a quantidade absoluta de transporte pessoal e de frete também aumentou (BACKMAN; ROGULSKA, 2016).

Até 2020, a Diretiva de Energia Renovável (RED)⁶, estabeleceu uma cota obrigatória de 10% de fontes renováveis de energia para o setor de transporte. A RED também estabeleceu requisitos para os combustíveis líquidos, incluindo um mínimo de emissões de gases efeito estufa e sobre a questão do uso do solo. Outras diretivas europeias também definem estratégias para reduzir suas emissões no setor de transporte:

- a) a Diretiva de Padrões de Combustíveis de Baixo Carbono (2009/30/EC) requer de 6 a 10 % na redução da intensidade de gás efeito estufa de estradas e naves de rios e lagos até 2020, comparando-se com a situação de 2010;
- b) a Diretiva de Aquisição de Veículos Limpos pelo Setor Público (2009/33/EC) estabelece que os setores públicos devem ter o propósito de aumentar a sua frota de veículos sustentáveis;
- c) a Diretiva de Combustíveis Alternativos (2014/94/EU) determina a construção de uma rede de postos de abastecimento para metano, hidrogênio e eletricidade, a que se mostrar como a alternativa mais sustentável de mobilidade (BACKMAN; ROGULSKA, 2016).

⁶ Cf.: EUR-LEX. Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 23 de abril de 2009, relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis que altera e subsequentemente revoga as Directivas 2001/77/CE e 2003/30/CE. Jornal Oficial da União Europeia. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=celex:32009L0028>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

No fim de 2016, a Comissão Europeia revisou a RED e propôs o encerramento do uso de biocombustíveis a partir de biomassa alimentar em 2021. Também introduziu cotas para biocombustíveis avançados e critérios de sustentabilidade para biomassa florestal. Aos fornecedores de combustíveis para a Europa, a chamada RED II propôs obrigação de crescente fração de combustíveis renováveis e de baixo carbono, incluindo biocombustíveis avançados, combustíveis renováveis de origem não biológica, combustíveis a partir de resíduos e eletricidade renovável. Os níveis dessa obrigação vão progressivamente aumentar de 1.5% em 2021 para 6.8 % em 2030, incluindo ao menos 3.6% de combustíveis avançados (BIO FUEL NEWS, 2016).

O biogás é apropriado para alcançar tais metas: limpo, versátil e pode ser purificado para substituir os usos de gás natural. Muitos projetos europeus (*GasHighway*, *Biomaster*, *Baltic Biogas Bus*, entre outros) já demonstraram que a cadeia de biogás e biometano pode não apenas gerar empregos, aumentar a segurança energética e a competitividade de longo prazo (criação de um novo mercado), mas também é bastante apropriada para a demanda de transporte. Afinal, muitos fabricantes de veículos têm em linha veículos movidos a gás natural (BACKMAN; ROGULSKA, 2016).

2.3 ROTAS TECNOLÓGICAS E SUAS PERSPECTIVAS NO BRASIL

No Brasil, embora o tratamento térmico com recuperação energética e a digestão anaeróbica sejam mais apropriadas tanto para a mitigação das mudanças climáticas quanto para a gestão de resíduos (hierarquia de resíduos), o aproveitamento energético de resíduos é bastante incipiente. A situação do país é crítica, com relação à precariedade da gestão de resíduos sólidos, e bastante explorada e conhecida. Já com relação à matriz energética, o Brasil se encontra historicamente avançado na descarbonização, se comparado com a média dos países. Porém, tal situação, em vez de avançar num ritmo apropriado, tem se mantido inalterada.

Essa realidade poderia ser bastante diferente com o desenvolvimento das tecnologias de aproveitamento energético de resíduos, que ofertariam ao país energia a partir de materiais residuais, com grande fração renovável e sem a intermitência característica de algumas renováveis (os resíduos precisam ser sempre tratados). Com isso, poder-se-ia não apenas mitigar os impactos ambientais dos resíduos, mas também reduzir a carga sobre as hidrelétricas, aumentando a sua capacidade de reserva e, conseqüentemente, reduzir a necessidade das térmicas a combustíveis fósseis.

Ou seja, considerando-se os dois lados da equação seria uma ótima oportunidade para o Brasil resolver dois aspectos ambientais relevantes com uma mesma iniciativa: a) manter uma matriz energética renovável, com uma fonte energética firme, que poderia aumentar a capacidade de armazenamento das hidrelétricas que, por sua vez, serviria de “colchão” para o avanço das fontes renováveis intermitentes; b) avançar na hierarquia de resíduos e economia circular com menor desperdício material e energético dos resíduos que, hoje, são, na melhor das hipóteses, aterrados.

Para tanto, é preciso avançar na legislação e no marco regulatório de ambos, especialmente no que diz respeito aos resíduos, para que a procura não seja apenas por uma solução mais econômica, e sim contemple os benefícios socioambientais e as externalidades positivas.

2.4 SITUAÇÃO ENERGÉTICA E INTERFACE COM RSU NO BRASIL

O Brasil é mundialmente conhecido por seu vasto território repleto de recursos naturais. Monzoni e Osório (2014) afirmam que esses aspectos tornam o país um candidato natural a liderar o mundo em direção à economia de baixo carbono. Estudos como os do Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) (2010) ressaltam que os recursos naturais em seu vasto território preservado, enormes quantidades de água e mesmo as tecnologias baseadas na biomassa poderiam contribuir para que o país ocupasse uma posição de destaque na migração para a economia de baixo carbono.

No que se refere a energias renováveis, por exemplo, o país tem larga vantagem, já que durante longo período ocupou uma posição proeminente, com a maior fração de energias renováveis na matriz, se comparado a países similares, sendo destaque a energia hidrelétrica. Ainda hoje, o país está bem acima da média mundial.

O balanço energético de 2016, por exemplo (EPE, 2017) demonstra que a fração do consumo de energia a partir de energias renováveis chega a 43,5%, muito mais do que a média mundial (13,5% em 2014) e ainda maior do que a média da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE), que é menos de 10% (2014).

Entretanto, o desempenho brasileiro rumo à economia de baixo carbono estagnou e em determinados momentos retrocedeu. Em 2012, a fração já era 42,3, mas em 2014, em função da crise hídrica, desceu para, 39,4% (EPE, 2017).

Enquanto isso, na Europa, só em 2015, 77% da capacidade adicionada no continente era de fonte renovável (EEA, 2017). De 2005 a 2014, o crescimento do uso de biocombustíveis em transporte cresceu em média 18% ao ano, de um nível bastante baixo até 6% de todo o seu consumo (almejando 10% em 2020). No mesmo período, o crescimento da eletricidade a partir de fontes renováveis cresceu em média 7% anualmente e o uso térmico de fontes renováveis cresceu 3% anualmente. Isso se traduz em avanço contínuo (15%, em 2013; 16% em 2014; 16,7%, em 2015) das fontes renováveis na matriz energética total.

Em alguns países o crescimento é ainda maior. Na Suécia, por exemplo, a fração em 2014 já supera 50%, e enquanto a fração da hidroeletricidade permanece a mesma, a biomassa cresce de maneira constante há mais de 40 anos e a eólica e a solar têm tido um enorme crescimento nos últimos anos, indicando uma tendência ainda maior de aceleração (SWEDISH ENERGY AGENCY, 2015).

Um dos problemas para o Brasil avançar é que o alto nível da fração de energias renováveis é baseado em tecnologias maduras, como hidroeletricidade e coprodutos da indústria sucroalcooleira (etanol e incineração de bagaço). As novas tecnologias são ainda incipientes. Apesar do recentíssimo crescimento (55% de 2015 para 2016), a energia eólica ainda representa 1% da energia ofertada, e mesmo assim esse montante é cerca de 400 vezes maior que a energia solar aproveitada, a despeito de todo o potencial oferecido pelo alto nível de insolação no país (EPE, 2017).

De acordo com Ribeiro e Tisi (2016), uma grande oportunidade para ampliar a fração de renováveis está na produção de energia a partir de resíduos sólidos (*Waste-to-Energy*). O uso energético de resíduos sólidos, amplamente utilizado em muitos países, é negligenciado no Brasil, com poucas exceções de aproveitamento de gás de aterro. Não obstante, um enorme potencial existente com o grande volume de resíduos, em especial gerados nas grandes concentrações urbanas, onde também está a principal carga de demanda energética.

Essa geração próxima dos centros de carga pode reduzir o impacto ambiental de novas plantas geradoras em regiões distantes e preservadas e reduzir custos e perdas na transmissão. Outra vantagem é que essa fonte energética pode ser usada na base, já que não é intermitente como a energia solar ou a eólica.

Mas a maior vantagem é tratar da questão dos resíduos sólidos que vêm se tornando cada vez mais dramática no país. Ambas as tecnologias poderiam ser essenciais: o biogás a partir de resíduos orgânicos (que pode ser produzido por codigestão com outros resíduos orgânicos como lodo de esgotos e resíduos industriais); e plantas de incineração que recuperam calor e eletricidade dos resíduos. Ambos podem ser importantes para dar destinação correta, evitar o aterramento e o desperdício de recursos.

Portanto, o potencial de geração energética de resíduos é enorme no Brasil. Não obstante, como outras fontes de energia, essas tecnologias ainda precisam de apoio governamental para substituir as fontes fósseis. A grande necessidade de investimentos, principalmente na purificação do biogás e no tratamento dos gases emitidos (no caso da incineração) necessitam ao menos de um quadro regulatório estável e previsível, além outras políticas auxiliares (TORRES; BAJAY, 2015).

2.4.1 A questão dos resíduos no Brasil

O Brasil tem um enorme desafio com relação aos resíduos sólidos urbanos. De acordo com o Relatório do Panorama de Resíduos Sólidos Municipais, publicado pela Associação de Empresas de Limpeza Urbana e Resíduos Especiais (ABRELPE, 2017), dentro do universo de 404 prefeituras, o montante de resíduos dispostos de forma imprópria, em 2013, era de 41,74%. O que significa 78.987 toneladas diárias de resíduos jogadas diretamente em locais impróprios, os chamados “lixões”.

Muitos desses lixões começam como aterros regulares. Porém, operados de forma inadequada, se tornam “lixões” que contaminam o solo e os lençóis freáticos e abrigam vetores de doenças. De acordo com Veiga (2016), há ainda 20 mil toneladas diárias para os quais não existe informação sobre seu paradeiro, inferindo-se que são jogados em qualquer lugar, em solo aberto ou corpos d’água.

A Lei 12.305, de 2 de agosto de 2010, veio tentar resolver a questão, mas as metas de encerrar a destinação imprópria são constantemente postergadas. O argumento é que as prefeituras não têm dinheiro nem infraestrutura para operar de forma apropriada os aterros. É inútil financiar a construção destes se não há meios para operá-los de forma apropriada. Segundo Veiga (2016), são necessários apenas três meses de falta de manutenção apropriada de um aterro para transformá-lo em um “lixão”. Esse é um dos principais desafios para as pequenas cidades, para o governo federal e para as agências ambientais.

Entretanto, existe outra grande questão própria das grandes cidades. Se as pequenas cidades têm dificuldade de construir e gerir aterros por falta de recursos financeiros, isso não é problema para as grandes cidades. O problema dessas cidades é encontrar espaços em cidades tão adensadas para aterrar a quantidade cada vez maior de resíduos. Afinal, não apenas cresce a população, mas também cresce a própria geração per capita de resíduos. Em 2017, o relatório da Abrelpe mostra que a quantidade de resíduos gerados por pessoa atingiu 1,035 kg por dia, conforme Figura 5. Em 2009, a geração per capita por dia era de 0,98 kg.

Figura 5 – Crescimento da geração de RSU 2016-2017

Fonte: Abrelpe (2018, p. 15).

Uma vez que as grandes cidades continuam a crescer, o espaço para aterramento diminui. Além das grandes cidades, há outras regiões com limitação de espaços disponíveis. No caso do Estado de São Paulo, um exemplo desse tipo de região é o litoral, pois é uma região que, limitada de um lado pelo mar e, de outro, pela Serra do Mar (ambientalmente protegida) carece de espaço para aterrar os seus resíduos. Em alguns casos, os resíduos precisam fazer grandes viagens, até mesmo subindo a Serra, como mostra a Figura 6.

Figura 6 – Destinação dos resíduos do litoral paulista

Fonte: Emae (2009).

Nesse caso, soluções alternativas de tratamento de resíduos podem ser viáveis, se considerarmos as distâncias que os resíduos devem percorrer até chegar à destinação apropriada. Mesmo que a destinação final custe menos que as alternativas, os custos de transporte tornam as alternativas mais atraentes. Especialmente se, além dos custos efetivos, considerarmos os custos sociais não contabilizados (externalidades) como emissões de gases efeito estufa e trânsito nas estradas.

A questão energética ligada aos resíduos é outra razão para repensar a forma de destinação e tratamento de resíduos no Brasil. Da forma atual, de produção linear, usa-se grandes quantidades de energia para extrair e transformar a matéria-prima bruta em materiais de consumo. Esse material, após sua vida útil é aterrado (quando o é) sem nenhuma, ou quase nenhuma, recuperação de energia. E essa energia desperdiçada impacta nas emissões não apenas do aterro, mas também na matriz energética, já que com o não aproveitamento da mesma se faz necessária a expansão do parque gerador, que, por sua vez, demanda busca de fontes em regiões cada vez mais distantes dos centros de carga, áreas usualmente com cobertura vegetal, grandes armazenadora de carbono.

A reciclagem é uma forma muito eficiente de recuperação de energia, mas alcança menos de 8% do total de resíduos (EPE, 2014b). As outras formas de recuperação energética poderiam reduzir os custos, perdas e emissões da expansão e transporte energético. Esses aspectos multidisciplinares de sustentabilidade poderiam estar presentes no marco regulatório e no contexto de políticas públicas brasileiro. Contudo, no país, os departamentos, setores e até mesmo as leis são pensados sob o ponto de vista da segmentação.

Um grande exemplo é que a própria lei de resíduos sólidos (Lei 12.305 de 2010) brasileira tem pouca interação com a lei de saneamento (11.445 de 2007), embora esta última cite os resíduos sólidos como uma de suas áreas de abrangência (art. 3, inciso I, alínea c).

2.4.2 Lei de Resíduos Sólidos

De acordo com Bennati (2005), a preocupação oficial com resíduos em nível nacional data de 1954, mas abordava apenas o aspecto relacionado à saúde. A Lei 2.312, de 1954, estabelecia que a coleta, transporte e disposição final dos resíduos deveriam seguir condições que não causassem inconvenientes para a saúde pública e o bem-estar. Essa lei foi incorporada e detalhada pelo Decreto 49874^a, de 1961, que se tornou o Código Nacional da Saúde.

Dessa época em diante resíduos sólidos ganharam mais importância devido ao seu grande potencial de contaminação. Novos materiais inorgânicos com grande potencial de contaminação foram adicionados aos resíduos que, anteriormente, consistiam basicamente de restos de comida. Além disso, houve um aumento das preocupações ligadas às limitações do consumismo característico do século XX, o que impactou também no Brasil (HISATUGO, 2007). Desse modo, se fez necessário um marco regulatório para o assunto.

A Lei Brasileira de Resíduos Sólidos precisou de um longo tempo de maturação. A iniciativa parlamentar teve início em 1991, mas se tornou realidade apenas em 2010, quando a Lei 12.305/2010 foi promulgada. O texto da lei é bastante ambicioso. Todavia, essa ambição em vez de ser positiva, pode ser enganosa.

Por exemplo, a Lei tem 15 objetivos (art. 7), mas alguns são pouco mencionados no resto do corpo do texto. Como exemplos, pode-se citar “contratações governamentais”, “recuperação dos custos”, “avaliação do ciclo de vida do produto” ou “rotulagem ambiental”, aos quais não se refere mais no restante do texto. Embora muitas dessas questões possam ser deixadas para os Planos de Resíduos Sólidos previstos na lei (capítulo II), era de se esperar mínima abordagem desses objetivos para evitar imprecisão.

No artigo das definições (capítulo 1, título 2, artigo 3), a lei estabelece uma importante distinção: “Rejeitos” X “Resíduos”. Nesse artigo, o inciso XV define “rejeitos” como: “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada” e os diferencia dos resíduos sólidos (XVI) que são:

[...] material, substância, objeto ou bem descartado resultante de atividades humanas em sociedade, a cuja destinação final se procede, se propõe proceder ou se está obrigado a proceder, nos estados sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d'água, ou exijam para isso soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível (BRASIL, 2010).

Essa definição é crucial para entender o aspecto mais controverso da lei, uma vez que, em seu artigo 54, a Lei estabelece a regra mais esperada dessa lei: “A disposição final ambientalmente adequada dos *rejeitos*, observado o disposto no § 1º do art. 9º, deverá ser implantada em até 4 (quatro) anos após a data de publicação desta Lei” (grifo nosso).

Em uma interpretação literal dever-se-ia concluir que após esse período poderiam ser aterrados apenas rejeitos (resíduos sólidos que, esgotadas as possibilidades de tratamento e recuperação, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada). Ou seja, só poderiam ser aterrados resíduos já tratados ou de tratamento impossível. O que, entretanto, se entendeu (e o próprio governo divulga essa definição) é que a disposição imprópria (“lixão”) seria proibida nesse prazo (CARDOSO; ALVES, 2012). Mesmo com essa definição simplificada, os prazos desse capítulo têm sido protelados.

A Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) estabelecida pela lei baseia-se em 11 princípios (art. 6), entre eles: “I – a prevenção e a precaução”, assegura que, se o tomador de decisão tiver informação sobre o potencial impacto de uma iniciativa e ainda assim ignorar, ele será responsabilizado; “II – o poluidor-pagador e o protetor-recebedor”, estabelece que quem deve pagar pelos danos é quem os causa; “VII – a responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos;”, torna toda a cadeia de valor responsável pelos danos; e “XI – a razoabilidade e a proporcionalidade”, estabelece que cada responsabilização deve ser proporcional à participação no dano.

No artigo art. 9, do título III, a Lei, como na maioria das leis referentes ao assunto, estabelece a pirâmide inversa da hierarquia de resíduos: “Na gestão e gerenciamento de resíduos sólidos, deve ser observada a seguinte ordem de prioridade: não geração, redução, reutilização, reciclagem, tratamento dos resíduos sólidos e disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos.” Além disso, no seu primeiro parágrafo, a Lei abre perspectiva para a recuperação energética de resíduos, quando estabelece que:

§ 1 Poderão ser utilizadas tecnologias visando à recuperação energética dos resíduos sólidos urbanos, desde que tenha sido comprovada sua viabilidade técnica e ambiental e com a implantação de programa de monitoramento de emissão de gases tóxicos aprovado pelo órgão ambiental.

O curioso é que o artigo 54, que estabeleceu o prazo mais ambicioso da lei, faz uma referência direta a esse parágrafo, reforçando a ideia de que o prazo diz respeito não ao fim da disposição inadequada, mas de qualquer aterramento de resíduos não tratados, como pode se ver no texto: “Art. 54. A disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, observado o disposto no § 1º do art. 9º, deverá ser implantada em até 4 (quatro) anos após a data de publicação desta Lei”.

2.4.3 Potencial de recuperação energética no Brasil

Em 2014, devido ao crescente problema de resíduos sólidos no Brasil e à disseminação das experiências de recuperação energética no mundo, a EPE publicou uma nota técnica, o Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Basicamente, três alternativas foram consideradas: gás de aterro, plantas de digestão anaeróbica e plantas de incineração; embora o estudo também tenha mencionado ciclo combinado otimizado e biometano (EPE, 2014b).

De acordo com o documento, excetuando-se o gás de aterro, todas as tecnologias precisam de uma escala mínima de 150 toneladas/dia. Portanto, o inventário retirou do estudo a maioria das cidades brasileiras com população insuficiente para produzir esse volume. O potencial de gás de lixo, baseado nas premissas de recuperação de 20% do metano encontrado, foi bastante limitado e, para verificar a escala necessária, encontrou-se apenas 56 localidades e uma produção total de 211 ktep.

Com relação às premissas da incineração, o estudo considerou a necessidade de um Poder Calorífico Mínimo de 2000 kcal/kg e necessidade de grande fração de papel e plástico (86,5%) para alcançar o Poder Calorífico Mínimo. O estudo encontrou 106 cidades capazes de alcançar a escala e as condições dos resíduos. Essas cidades poderiam adicionar uma potência de 3176 MW ao sistema, que poderia abastecer 236520 GWh/ano ou 2.153 ktep (EPE, 2014b).

Quanto à digestão anaeróbica, o potencial foi calculado a partir de uma taxa de conversão de 55 m³/tonelada e uma eficiência na conversão elétrica de 33%. Portanto, a digestão anaeróbica pode adicionar uma potência de 868 MW e produzir 6701 GWh de eletricidade ao ano ou 589 ktep. Foi considerado o potencial de 1021 plantas (EPE, 2014b).

Para considerar outro uso (não elétrico) do biogás, se faz necessária sua purificação. Nesse caso, o potencial encontrado foi de 678 milhões de m³ anuais para gás de aterros e 1530 milhões m³ para digestão anaeróbica. Nesse caso, o rendimento seria maior: 583 ktep para gás de aterro e 1.315 ktep para digestão anaeróbica (EPE, 2014b). Considerando apenas a recuperação energética dos processos, a incineração teria de longe o maior potencial (2.153 ktep, contra 1.315 ktep da digestão anaeróbica com uso direto – não elétrico).

Porém, o estudo também considera o potencial energético da reciclagem. Uma vez que, segundo o estudo, a incineração usaria papéis e plásticos, a energia recuperada pela reciclagem seria bem menor do que a da digestão anaeróbica (3610 ktoe contra 18638). Portanto, segundo o estudo, considerando todo o potencial da digestão anaeróbica combinada com a reciclagem, ela cresce para 19226 ktoe (para produzir eletricidade) ou 19953 ktoe para produzir e usar como combustível o biometano (EPE, 2014b).

2.4.4 Recuperação energética por incineração no Brasil

No Brasil, não há plantas de incineração de resíduos sólidos urbanos. Entretanto, ao longo do tempo algumas iniciativas foram tentadas, mas todas fechadas. A primeira delas, ainda em 1896, foi construída em Manaus e fechada em 1958. Outra foi construída em Belém, mas fechada em 1978. Em 1913, uma foi construída na região de Araçá, em São Paulo, e fechada em 1948. Na cidade, a última foi construída em Pinheiros, em 1949, e fechada em 1990. Além dessas tentativas, no Rio de Janeiro vários prédios tinham seus próprios equipamentos de incineração, mas foram banidos entre os anos 1969-70, uma vez que eram caixas de incineração sem nenhum controle (MENEZES, 2000).

Embora a incineração não seja usada para tratar resíduos sólidos urbanos, ela é usada para tratar resíduos especiais, como os resíduos industriais perigosos, resíduos de aeroportos e outros. Desde 1970, foram instalados vários incineradores para a indústria química (MENEZES, 2000). Do mesmo modo, alguns produtos pós-consumo sob responsabilidade do produtor, como pneus, também são queimados em fornos de clínquer para gerar calor e energia à indústria cimenteira.

Já para resíduos sólidos urbanos, apesar de praticamente todo o montante de resíduos sólidos ser aterrado com uma quantidade irrisória de recuperação de metano, não há plantas de incineração. Algumas iniciativas vêm sendo tentadas e encontram uma série de obstáculos. Uma delas ocorre na cidade de Barueri.

Barueri é uma cidade da Região Metropolitana de São Paulo e tem aproximadamente 250 mil habitantes. A cidade tem regiões ricas (como Alphaville) e outras bem pobres, mas na média do PIB per capita é uma cidade rica. É a 14ª cidade mais rica do país e a sexta do estado de São Paulo.

Em 2011, as autoridades municipais publicaram um edital para promover uma Parceria Público Privada (PPP) para tratar os resíduos sólidos urbanos da cidade. Atualmente, esses resíduos vão para o aterro operado pela CTR TECIPAR, em Santana do Paraíba, uma cidade distante 20 km de Barueri, e a quantidade de resíduos é 269 toneladas por dia.

O termo de referência da licitação exigiu que a planta de tratamento, além da reciclagem, recupere energia de resíduos não perigosos. A planta deveria ter início em 2013, deveria operar durante 28 anos e atender ao crescimento da cidade. Portanto, deveria ter uma capacidade de tratar 750 toneladas/dia, das quais o município se comprometeria apenas com a fração que lhe coubesse (naquele momento 250 toneladas/dia), e a empresa poderia vender a capacidade ociosa.

O modelo tecnológico indicado pelo termo de referência foi CHP *mass burning* (cogeração sem pré-tratamento), com redução de no mínimo 85% da quantidade de lixo. Tal planta, entretanto, apesar de ter obtido licença ambiental, ainda espera resposta do órgão regulador de saneamento, a Agência Reguladora de Saneamento e Energia do Estado de São Paulo (Artesp), sobre a possibilidade de ser regulada.

2.4.5 Biogás e biometano no Brasil

No Brasil, a captação de biogás basicamente iniciou com a disseminação do Mecanismo de Desenvolvimento Limpo (MDL) ou, como é mais conhecido, “Créditos de Carbono”, previstos na Convenção Quadro das Mudanças Climáticas das Nações Unidas (UNFCCC), e postos e implantados pelo Protocolo de Quioto.

De acordo com esse mecanismo, os países que tinham limitação de emissões segundo o Protocolo de Quioto, poderiam “comprar” a redução de emissões em países não obrigados à redução (em desenvolvimento). Como o metano causa mais de 20 vezes mais danos ao clima do que o dióxido de carbono, a simples queima dele, antes de ser emitido para atmosfera, era passível de receber esses créditos. O esforço então se concentrou na captação do metano para a sua queima. Poucos projetos (os maiores) aproveitavam o gás para gerar energia. Dentre os casos de sucesso, a maior parte foi para gerar energia elétrica.

Em julho de 2016, de acordo com o Banco de Geração Elétrica (BIG) da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), havia 28 plantas de biogás que reuniam uma potência de 121 MW. A maior parte das plantas de biogás é de aterros. A primeira delas, inaugurada em 2003, inicialmente tinha 20MW de capacidade, mas atualmente tem uma capacidade de 4,6MW. A geração de biogás para eletricidade pode ser conferida no Quadro 1:

Planta	Data de operação	Potência(kW)	Proprietário	Cidade
Salvador	22/12/2010	19.730	100% to Termoverde Salvador S.A.	Salvador – BA
São João Biogás	27/03/2008	24.640	100% to São João Energia Ambiental S.A	São Paulo – SP
Energ-Biog	18/12/2002	30	100% to Biomass Users Network do Brasil	Barueri – SP
Unidade Industrial de Aves	-	160	Unidentified	Matelândia – PR
Unidade Industrial de Vegetais	-	40	Unidentified	Itaipulândia – PR
ETE Ouro Verde	-	20	100% to Companhia de Saneamento do Paraná – Sanepar	Foz do Iguaçu – PR
Star Milk	-	110	100% to Ibrahim Faiad	Céu Azul – PR
Asja BH	-	4.278	100% to Consorcio Horizonte Asja	Belo Horizonte – MG
Arrudas	-	2.400	100% to Companhia de Saneamento de Minas Gerais	Belo Horizonte – MG
Ambient	-	1.500	100% to Ambient Serviços Ambientais de Ribeirão Preto S.A	Ribeirão Preto – SP
Biotérmica Recreio	24/06/2015	8.556	100% to BioTérmica Energia S.A	Minas do Leão – RS
Granja Makena	02/01/2008	80	100% to Altair Olímpio de Oliveira	Patrocínio – MG
Ajuricaba	-	80	100% to Município de Marechal Cândido Rondon	Marechal Cândido Rondon – PR
Fazenda Nossa Senhora do Carmo	-	80	100% to Sérgio Elias Saraiva	Ituiutaba – MG
Uberlândia	01/12/2011	2.852	100% to Energias Geração de Energia Ltda	Uberlândia – MG
Granja São Roque	15/10/2009	424	100% to Master Agropecuária Ltda.	Videira – SC
Cetrel Bioenergia JB	-	874	100% to UTE Cetrel Bioenergia JB	Cachoeirinha – PE
Fazenda Da Luz	15/08/2011	810	100% to Da Luz Energia Ltda.	Abelardo Luz – SC
Cogeração Bio Springer	10/06/2011	848	100% to Bio Springer do Brasil Indústria de Alimentos S.A.	Valinhos – SP
CTR Juiz de Fora	01/08/2013	4.278	100% to VALORGAS – ENERGIA E BIOGAS LTDA	Juiz de Fora – MG
Itajaí Biogás	01/02/2013	1.065	100% to Itajaí Biogás e Energia S.A.	Itajaí – SC
Termoverde Caieiras	15/07/2016	29.547	100% to Termoverde Caieiras Ltda	Caieiras – SP
Guataporá	29/08/2014	5.704	100% to Guataporá Energia S.A.	Guataporá – SP
Bandeirantes	03/11/2014	4.624	100% to Biogás Energia Ambiental S.A	São Paulo – SP
Curitiba Energia	11/01/2016	4.278	100% to CURITIBA ENERGIA SPE LTDA	Fazenda Rio Grande – PR
Tecipar	30/10/2015	4.278	100% to Tecipar Engenharia e Meio Ambiente LTDA	Santana de Parnaíba – SP
Ronaldo de Freitas Silva	15/01/2013	120	100% to Ronaldo de Freitas Silva	Uberlândia – MG
Adelar Piaia	06/06/2014	100	100% to Adelar Piaia	Três Passos – RS

Quadro 1 – Plantas de biogás no país

Fonte: Aneel (2016).

Além das plantas listadas no Quadro 1, há o aterro de Gramacho que, por mais de três décadas, foi o maior “lixão” da América Latina, até fechar em 2012. A área foi coberta e instalada uma planta de recuperação, tratamento e purificação de biogás. A planta deve operar por 17 anos e evitar a emissão equivalente de 6 milhões de toneladas de CO₂. A produção dali é usada na refinaria Reduc da Petrobras, aproximadamente 49 mil m³/dia de biometano, que representa 2.5% do total de consumo de gás natural da refinaria (PETROBRAS, 2014). Uma vez que este biometano não é convertido em eletricidade, o projeto não é listado pela Aneel.

Em julho de 2016, começou a operar a maior planta termelétrica a partir do biogás do Brasil. Localizada na cidade de Caieiras, nos arredores da cidade de São Paulo, a Termoverde tem uma potência de 29,5MW e uma produção de 250 mil MWh ao ano, suficiente para atender uma cidade de cerca de 300 mil habitantes (SECRETARIA DE ENERGIA E MINERAÇÃO, 2016).

Em 2018, foi anunciado o primeiro digestor anaeróbico para resíduos de estação de tratamento de esgotos e resíduos orgânicos. A planta será localizada no Paraná e tratará 1000 m³ de resíduos de esgoto e 300 toneladas de resíduos orgânicos por dia, com potência de 2,8 MW de energia elétrica (MARTINS, 2018), cujo potencial, entretanto, permanece pouco explorado, pois há alguns estudos que mostram um potencial muito maior.

Salomon e Lora (2005), por exemplo, consideram que se poderia produzir 1,2 milhão de kw de biogás a partir de resíduos sólidos urbanos, esgoto, vinhaça, esterco e resíduos de abatedouros. Zanette (2009), considerando apenas algumas plantas viáveis do Sudeste, estipula 338 mil m³ de biogás por dia. Usando o mesmo critério econômico (só plantas viáveis economicamente), mas considerando o país inteiro, o autor prevê um potencial de 3797 mil m³ por dia de aterros, e, considerando agricultura e abatedouros, um potencial de mais de 15500 mil m³ por dia.

Não obstante, essas avaliações consideram o uso de biogás para convertê-lo em eletricidade, mas nenhuma considera o uso direto para energia térmica (calor/frio) e para gerar energia mecânica mais eficiente que combustível. Embora o biogás possa ser uma importante fonte energética para assegurar uma matriz elétrica firme e renovável, ele pode ser usado para substituir os combustíveis fósseis onde ele é ainda mais eficiente e também mais apropriado para substituir os combustíveis fósseis: no aquecimento e uso mecânico.

Nesse caso, o mercado de biometano pode aproveitar a infraestrutura da distribuição e o mercado de gás canalizado do gás natural. Uma vez que o gás natural é menos poluente e menos danoso para o clima que os demais combustíveis fósseis, muitos países, estados e cidades desenvolveram infraestrutura de distribuição de gás canalizado para substituir o uso de petróleo e carvão. É o caso do estado de São Paulo, onde só na área de concessão da Comgás são atendidos mais de 1,8 milhão de clientes, em 88 municípios, por uma rede de mais de 15 mil quilômetros de extensão (COMGÁS, 2018).

Em 4 de dezembro de 2012, considerando as vantagens do biogás no lugar de combustíveis fósseis, o governo de São Paulo estabeleceu o Programa Paulista de Biogás, cujo objetivo primeiro consistia em encorajar a disseminação das energias renováveis na matriz energética do estado a partir das externalidades positivas do gás gerado da biomassa; depois, visava estabelecer um mínimo de fração de biometano na rede de gás canalizado do estado.

Um projeto que está sendo desenvolvido na Universidade de São Paulo (USP), liderada por uma parceria entre o Research Centre for Gas Innovation (RCGI), o Grupo de Pesquisa em Biomassa (GBio), e o Instituto de Energia e Ambiente (IEE), está avaliando o potencial total de injeção do biometano na rede de gás natural. Os estudos preliminares consideram aterros, estações de tratamento de esgotos, vinhaça e resíduos de agricultura e chegam a um potencial que corresponde a cerca de 45% do consumo de gás natural no estado (COELHO, 2016). Os dados estão resumidos na Tabela 3:

Tabela 3 – Potencial de biometano no Estado de São Paulo

Potencial de biometano no Estado de São Paulo	Potencial de biogás (m ³ /h)	Potencial de Biometano (m ³ /h) –
Aterros	276.191	138.096
Estações de Tratamento de Esgotos	49.200	24.600
Vinhaça	302.848	151.424
Agronegócios e matadouros	15.155	7.580
SÃO PAULO Total	643.394	321.700

Fonte: Coelho (2016).

Esses números, que cobrem apenas o estado de São Paulo, demonstram que o potencial do Brasil deve ser maior do que as previsões anteriores. Esse potencial pode ser muito maior se, em vez de aterros, os resíduos orgânicos forem convertidos em biogás em digestores anaeróbicos. Para tanto, o Brasil precisaria inicialmente criar um sistema de separação dos resíduos alimentares para destiná-los a digestores anaeróbicos.

2.5 ASPECTOS PRINCIPAIS DO CAPÍTULO 2

A recuperação energética de resíduos se divide basicamente em duas rotas: a recuperação térmica e a recuperação biológica. A forma mais usada em tecnologia térmica de recuperação energética é a incineração. A incineração pode ser feita de forma direta (*mass burning*) ou por pré-tratamento (*fluidized bed* é um exemplo bastante usado). Essa forma de aproveitamento energético possui tecnologia de controle de efluentes gasosos consolidados e é comumente utilizada em países com alto padrão de controle ambiental.

Nesses países, a principal resistência se deve ao fato de que essa solução é apenas o primeiro passo para a economia circular. Na hierarquia de resíduos, a recuperação energética de resíduos é apenas o primeiro estágio acima do aterramento. Nesse sentido, dever-se-ia privilegiar a reciclagem (que recupera o material), a redução da geração e a prevenção da geração de resíduos, estágios superiores, no sentido de buscar uma economia circular.

Na prática, porém, se verifica que os países que mais recuperam energia por meio da incineração também são aqueles que mais reciclam. De outro lado, os que mais aterram são os que também menos reciclam. Ou seja, os países que ao menos se preocupam em recuperar a energia dos resíduos são aqueles que também mais recuperam seus materiais (reciclagem).

No sentido de melhorar a circularidade da economia, há maior aceitação da digestão anaeróbica da fração orgânica dos resíduos e recuperação energética do biogás gerado. Isso porque os nutrientes presentes nos resíduos desse processo produtivo podem ser revertidos para a cadeia produtiva na forma de biofertilizantes. Ocorre que para esse tipo de recuperação energética (dos resíduos exclusivamente orgânicos) é necessária uma separação muito mais acurada, até mesmo para que os nutrientes do biofertilizantes possam voltar para a cadeia (principal ponto positivo da rota).

No Brasil, há uma série de desafios que têm de ser superados, em especial na gestão de resíduos, para que qualquer uma das rotas se viabilize. A maioria das prefeituras (responsáveis pela questão) sequer dá destinação adequada aos resíduos sólidos urbanos, dispondo-os em lixões irregulares, sem controles ambientais. Ou seja, para essas prefeituras, a destinação sequer alcançou o patamar mais baixo da hierarquia de resíduos. Com isso, grandes avanços seriam necessários. Conhecer o exemplo de outros países que já estão em patamares mais avançados certamente traria grande contribuição na busca de soluções. E um desses países é a Suécia.

3 ANÁLISE DO CASO SUECO (*BENCHMARKING*)

A Suécia é um caso exemplar de desenvolvimento, uma vez que concilia diversos aspectos positivos: altos níveis de riqueza (o país de dez milhões de habitantes é o décimo país com maior PIB per capita); altos níveis de desenvolvimento humano (14º quarto no Índice de Desenvolvimento Humano), sem perder a sua competitividade (de acordo com o Índice de Competitividade Global do Fórum Econômico Mundial, o país é o décimo mais competitivo do mundo).

O país também é mundialmente conhecido por seu pacifismo – a última Guerra da Suécia ocorreu em 1814. Mas o país é principalmente conhecido por seu interesse em questões ambientais. Afinal, a primeira Conferência das Nações Unidas sobre Meio Ambiente Humano, de 1972, foi realizada na capital do país, Estocolmo, numa época em que o tema ainda era incipiente.

Um dos produtos dessa conferência é o Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA). Igualmente, a primeira agência ambiental do mundo, a Naturvardsverket, foi criada na Suécia, em 1967. Desde esse tempo, a Suécia vem atuando como uma liderança ambiental. Mas nem sempre o país foi assim próspero e consciente.

Muito embora a Suécia seja considerada tradicionalmente como um país desenvolvido com alta capacidade industrial e de engenharia, a associação do país com a tecnologia é relativamente recente. Durante o século XVII, o país era conhecido por sua exportação de recursos naturais, como cobre e ferro. No século XVIII, a Suécia representava um terço da produção global de barra de ferro; e no século seguinte, enquanto outros países avançavam em suas revoluções industriais, na economia sueca crescia a importância do setor de produtos florestais voltados a suprir as necessidades energéticas do continente (BUSINESS SWEDEN, 2016).

Até o fim do século XIX, o sistema econômico sueco era altamente baseado em *commodities* e as atividades industriais se limitavam àquelas tradicionais, ligadas a essas *commodities*, como fundições, usinas e serrarias e atividades de refinamento para exportação de metais, por exemplo, cobre e ferro. E nos locais do país que não dispunha de recursos naturais, havia atividades tradicionais de produção artesanal de tecidos e madeira (CARLGREN, 2015).

Em meados do século XIX, a maioria das atividades era restrita por proibições e regulações, incluindo um sistema corporativo que delimitava estritamente quais pessoas poderiam exercer certos tipos de atividades e como essas atividades deveriam ser feitas. Desse modo, um importante passo em direção à livre iniciativa e liberdade de mercados consistiu na reforma liberal de 1846, que desmanchou todo o sistema de controle de atividades (CARLGREN, 2015). Em 1870, o país se tornou o maior exportador de madeira serrada, sucedido por um crescimento do setor de papel e celulose (BUSINESS SWEDEN, 2016).

Na segunda metade do século XIX, ao mesmo tempo em que a indústria tradicional se aperfeiçoava, uma revolução agrícola acontecia com uso de métodos avançados de cultivo em larga escala. Essas racionalizações fizeram com que a produtividade crescesse ao mesmo tempo em que parte da mão de obra se tornasse ociosa (CARLGREN, 2015).

Contudo, mesmo no fim do século, 90% da população sueca ainda sobrevivia da agricultura e o baixo nível de vida levava a uma grande emigração. Da metade do século XIX até meados de 1930, 1,5 milhão de suecos, de uma população de 3,5 milhões, em 1850, e pouco mais de 6 milhões, em 1930, emigrou, em sua maioria, para a América do Norte (SWEDEN GOVERNMENT, 2017).

A indústria mais sofisticada não existia até o final do século, quando, a partir de 1890, já em plena segunda revolução industrial, a indústria sueca se desenvolveu. Essa fase lançou as bases para uma verdadeira mudança de paradigma na economia. Ao mesmo tempo em que motores elétricos e à combustão substituíam as antigas máquinas a vapor e a industrialização passou a ser mais concentrada nas cidades, o país viu uma grande diversificação da sua indústria, voltada principalmente para a inovação (BUSINESS SWEDEN, 2016; CARLGREN, 2015).

Em fins do século XIX, a economia sueca foi capaz de tirar vantagem dos avanços tecnológicos e organizacionais realizados na Europa Ocidental e América do Norte na segunda Revolução Industrial. O crescimento contrastava com o passado em que a agricultura era a principal fonte de riqueza no país. Na virada do século XX, a indústria passou a ser a principal fonte de recursos e, em várias áreas, integravam a fronteira tecnológica que se desenhava na segunda Revolução Industrial (SCHÖN, 2008).

As novas empresas estavam intimamente ligadas ao conhecimento científico e de engenharia mais complexos. Os recém desenvolvidos motores elétricos se tornaram especialmente importantes na Suécia, onde empresas como ASEA (mais tarde ABB) aproveitaram a alta demanda de processos intensivo-energéticos e da alta capacidade de geração hidrelétrica no país.

O financiamento desse rápido desenvolvimento envolveu a criação de bancos comerciais, enquanto o Estado se envolvia no desenvolvimento da infraestrutura necessária para apoiar a eletrificação. Várias outras indústrias inovadoras aproveitaram essa demanda por mecanização. Muitas habilidades tecnológicas surgiram nessa época, entre elas: AGA, Ericsson, Separator (AlfaLaval) e SKF (SCHÖN, 2008).

Isso resultou num dos maiores crescimentos econômicos do período 1870–1970. Talvez, segundo Hansson e Jonung (1997), nesse período o país tenha alcançado a maior taxa de crescimento do mundo. O impacto dessa industrialização na economia do país pode ser observado na Tabela 4:

Tabela 4 – Crescimento econômico da Suécia de 1850 a 1950

Ano	PIB per capita	População	Força de trabalho	Capital por trabalho	Razão Capital/P IB	Energia tradicional per capita	Energia Moderna per capita
Unid.	Coroa Sueca (1911/12)	Mil	mil	SEK (1911/12)		Giga joules	Giga joules
1850	212	3483	1347	399	0.73	31	1
1870	289	4169	1567	772	1.00	29	3
1890	348	4780	1899	1399	1.60	27	11
1910	584	5449	2122	2442	1.63	28	27
1930	918	6131	2723	3212	1.55	24	36
1950	1520	7014	3099	6386	1.86	18	60

Fonte: Kander; Stern (2014).

Além do aspecto inovador, outro fator crucial para o desempenho econômico consistiu na forma colaborativa de desenvolvimento. A partir de 1932, depois de duas crises (1921-22 e o crash de 1929), o país desenvolveu um novo modelo econômico, o chamado “Modelo Sueco”. Tal modelo visa estabelecer um paradigma colaborativo que alcance algumas características: a) um grande setor industrial privado; b) um grande setor público financiado por impostos; c) grandes sindicatos; d) papel ativo do estado nas políticas de mercado trabalhista; e) a ambição de alcançar distribuição da renda e riqueza equânime (CARLGREN, 2015).

A política de mercado de trabalho, um acordo entre os sindicatos e as organizações dos empregadores, chamada de “política de salário solidário”, continha três elementos: salários iguais para trabalhos iguais, independentemente da capacidade individual das empresas de pagar; aumento dos níveis de salários em áreas de baixo pagamento, e com isso comprimir a distribuição de salários – a ideia era, na verdade, aumentar a velocidade na estrutural racionalização das indústrias para eliminar companhias e setores menos produtivos; regulação do mercado de capital desincentivando (via impostos altos) a possibilidade de apropriação de altos lucros aos proprietários da empresa, incentivando o reinvestimento (via impostos baixos) no reinvestimento na companhia (SCHÖN, 2008).

Uma demonstração do caráter colaborativo da economia sueca pode ser visto no exemplo do início da década de 1960, quando Arne Geijer, presidente de um sindicato de trabalhadores, e Bertil Kugelberg, sua contraparte empresarial, defenderam, no incrível senado americano, que trabalho e capital poderiam chegar a um acordo que levasse à modernização e beneficiar tanto capital quanto trabalho: trabalhadores aceitam maiores lucros contanto que estes fossem reinvestidos na expansão industrial (LÖNNROTH, 2010). E o acordo funcionou muito bem.

Depois da Segunda Guerra, durante a reconstrução da Europa, a economia sueca teve outro grande salto: a chamada “Era de Ouro”, de 1950-1975. Entre 1960 e 1965, a economia alcançou o seu pico, com um crescimento médio do PIB anual de 5,3% e aumento anual médio da produtividade de 5,6% (CARLGREN, 2015).

Essa expansão econômica, entretanto, trouxe problemas ambientais, entre eles a questão dos Resíduos Sólidos Urbanos. São dessa época as principais iniciativas governamentais com relação às questões ambientais.

3.1 POLÍTICAS AMBIENTAIS SUECAS

A Suécia é um estado unitário (não uma federação), com uma forte tradição legal, composta por três níveis de governo. O nível regional consiste no conselho dos municípios e na diretoria administrativa, esta é a instância responsável por implementar a política nacional. Há 290 autoridades locais (municipais), que são diretamente eleitas e têm posição extremamente importante no sistema político sueco, incluindo o poder de aumentar o imposto de renda (LÖNNROTH, 2010). Existem eleições de quatro em quatro anos, simultâneas à eleição do Parlamento Sueco (*Riksdag*), nas quais os suecos votam tanto para o Conselho do Condado como para os representantes do Conselho Municipal.

Tanto as autoridades dos condados como as municipais têm importante papel na implementação de políticas nacionais. As agências centrais do governo são razoavelmente independentes, sendo que somente o Governo como um todo, e não os ministros individuais, podem dar ordens e instruções para as agências. Mesmo assim, são ordens gerais, e não específicas. A Constituição proíbe o Governo de direcionar as agências em casos específicos. Os diretores das agências são apontados pelo governo para um mandato de seis anos. Portanto, no caso do meio ambiente, o ministro de meio ambiente tem controle apenas indireto com relação à respectiva agência (LÖNNROTH, 2010).

Na estrutura organizacional, o setor de meio ambiente consiste basicamente no ministro e nas agências. Entretanto, esse núcleo é cercado por outras agências focadas em missões diversas, mas relacionadas com a questão ambiental. As outras agências são exigidas legalmente para considerar a questão ambiental em suas decisões. O Governo possui mais de vinte agências, assim designadas, cercadas por organizações da sociedade civil (LÖNNROTH, 2010).

Os ministérios suecos são pequenos, se comparados aos padrões internacionais, e a implementação das políticas são largamente delegadas às agências. Basicamente, o Ministério do Meio Ambiente sueco tem como agências centrais: a Agência Ambiental, a Agência Química e a Agência para o Mar e Gestão das Águas. Não obstante, o Sistema de controle ambiental também compreende as cortes ambientais, que fazem parte do Sistema de Cortes sob o Ministério da Justiça (LÖNNROTH, 2010).

Por sua vez, as agências centrais se baseiam nos Conselhos do condado ou dos municípios e são eles que implementam as políticas ambientais do governo. Esses Conselhos têm importantes tarefas, de acordo com o Código de Meio Ambiente do país, principalmente com relação a licenciamento, fiscalização e relato. Os Conselhos do condado, baseados nas diretivas nacionais, traçam objetivos não apenas para os condados, mas também para seus municípios (LÖNNROTH, 2010).

Uma vez que as políticas ambientais são fortemente baseadas em conhecimentos específicos, o Ministério apoia várias agências envolvidas em pesquisa e inovação, como Formas e Vinnova, e também fundações independentes como a Mistra. Vale destacar que mesmo a Agência Ambiental tem seu próprio orçamento para a pesquisa acadêmica.

A sociedade civil, por sua vez, se articula com o Estado via: Instituto de Pesquisa Ambiental sueco (IVL), financiado tanto pela indústria quanto pelo Governo Sueco; Swan, organização de rotulagem ecológica estabelecida em 1990 pelo Conselho Nórdico; KRAV, organização de rotulagem ecológica criada em 1985; a Sociedade Sueca para a Conservação da Natureza (SNF), organização criada em 1909 que trabalha junto com WWF, Greenpeace e outras ONGs; o Conselho Sueco de Gestão Ambiental, responsável por declarações ambientais voluntárias de produtos (LÖNNROTH, 2010).

De acordo com Lönnroth (2010), a política ambiental sueca é baseada em quatro características: a) conhecimento a partir de uma forte base acadêmica de tecnologia e ciências naturais; b) sistema legal independente, com transparência e credibilidade; c) consenso social da importância de proteger a saúde humana e o meio ambiente; d) visão de sociedade compartilhada em economia aberta e modernização econômica.

O autor ressalta ainda a importância de algumas características culturais: a tendência de buscar o consenso em vez do confronto; amplo consenso pela modernização; alta valorização da racionalidade baseada na ciência. Portanto, o esforço colaborativo é parte essencial do sucesso das políticas ambientais na Suécia.

Ainda nos inícios da década de 1960, a indústria sueca percebeu que, cedo ou tarde, políticas ambientais seriam inevitáveis. O ponto de vista colaborativo prevaleceu e a indústria propôs ao governo uma instituição de pesquisa, em conjunto. Assim, criou-se o IVL para dar suporte científico às políticas.

Em 1967, o governo sueco criou a primeira agência ambiental do mundo, e a Lei de Proteção Ambiental entrou em vigor em 1969. A partir daí a indústria também optou por cooperação ao invés de confronto. Por exemplo, os representantes da indústria nos Conselhos aceitaram que a melhor opção tecnológica disponível deveria ser a base para a proteção ambiental. Com isso, de seu lado, a indústria tinha influência no ritmo de introdução dessa nova tecnologia.

Nascida no ambiente de modernização da virada para o século XX, a indústria viu na proteção ambiental outra força para a modernização. Contrariamente, a poluição era vista como resultado de uma tecnologia ultrapassada, suja e ineficiente. Os sindicatos também aceitaram o controle de poluição como outro fator de modernização. Subsídios governamentais para estações de tratamento poliram ainda mais as rodas da modernização (LÖNNROTH, 2010).

3.1.1 História das Políticas Ambientais Suecas

Na Suécia, desde o começo do século XX, problemas ambientais eram debatidos, às vezes com grande intensidade. Data de 1909 a primeira legislação para proteção do ambiente natural. Ao mesmo tempo, o parlamento sueco decidiu criar o primeiro parque nacional do país. Mas a questão só se tornou mesmo mais presente nos anos 1960 (SCHÖN, 2017).

Como antes mencionado, a Suécia começou a dar o seu salto rumo ao desenvolvimento industrial na virada do século, mas o período pós-guerra (1950-1975) é considerado a Era de Ouro, com um crescimento do PIB per capita de 3,6%, enquanto o investimento cresceu a uma taxa de 5.5% no período. Adiciona-se a isso o fato de que, ao contrário de outros países, a Suécia teve apenas uma suave queda durante a guerra (SCHÖN, 2017),

De acordo com Schön (2017), o período pós-guerra sueco foi caracterizado por dois aspectos: a fruição completa das grandes inovações industriais da segunda Revolução Industrial e a consolidação do estado de bem-estar (*welfare state*). O autor afirma que durante a “Era de Ouro” o bloco de desenvolvimento em torno da eletrificação e motorização resultou em uma ampla modernização da sociedade, em que o consumo e a produção de massa eram apoiados por programas sociais, de investimentos e políticas de Mercado de trabalho.

Portanto, durante a década de 1950, residências, estradas e usinas hidrelétricas foram construídas como nunca antes. Simultaneamente, os padrões de vida e de consumo de materiais iam crescendo e novos materiais, como os plásticos, começavam a ser amplamente usados. Também os números iam crescendo na Suécia: em 1959, havia um milhão de carros no país. Nove anos depois, esse número dobrava. Do mesmo modo, o uso industrial e agrícola de químicos se disseminava (LUNDGREN, 2011)

No início dos anos 1960, houve o primeiro alerta dos riscos ambientais na Suécia, por causa da mortandade de pássaros. Desde a década de 1940, compostos de mercúrio eram usados tanto na agricultura (alquil mercúrio para tratar sementes) como na indústria de papel e celulose (fenil mercúrio para prevenir a formação de lodo na polpa de papel). Ornitologistas encontraram pássaros mortos e doentes, suspeitando que o crescente uso de sementes tratadas com mercúrio era a causa desse impacto, pois o mercúrio era um elemento poluidor que poderia se acumular na cadeia alimentar e acabar consumido pelos humanos (LUNDGREN, 2011)

Esse foi apenas o primeiro alerta. Mas na década de 1960, a principal questão virou a poluição do ar. Em 1967, cientistas suecos atentaram para a crescente acidificação das chuvas, causadas pelo aumento europeu no uso de combustíveis fósseis contendo enxofre (LUNDGREN, 2011). Um ano depois da descoberta, uma lei determinou que se impedisse o uso de petróleo com altos teores de enxofre na Suécia.

Entretanto, outros países europeus continuavam a queimar petróleo com enxofre. E convencer outros países europeus de que as chuvas ácidas eram um problema que ultrapassava as fronteiras, tomou bastante tempo, uma vez que muitos se mostraram inicialmente céticos com relação à capacidade de as chuvas ácidas se espalharem por longas distâncias. Não obstante, os problemas de acidificação dos corpos d'água suecos continuaram.

No fim dos anos 1970, verificou-se que aproximadamente 17 mil lagos suecos estavam significativamente afetados pela chuva ácida, o que erradicou algumas plantas e animais especialmente mais sensíveis à acidez. Somente em 1979, outros governos europeus aceitaram juntar esforços: 35 países, liderados pela Suécia, assinaram a Convenção para Poluição de Ar de Longa Distância (UNECE4).

Em 1985, o primeiro protocolo para a redução das emissões de enxofre foi adotado, resultando significativa redução de emissões. Por toda a União Europeia, as emissões de dióxido de enxofre caíram 78% no período 1990–2008 (LUNDGREN, 2011).

Ao mesmo tempo, a Suécia teve de tomar algumas medidas referentes à proteção dos seus corpos d'água: em 1966, proibiu o uso de aquil mercúrio na agricultura; em 1967, proibiu o uso de fenil mercúrio e as emissões de mercúrio caíram pela metade. No mesmo ano, cerca de uma centena de locais de pesca foram fechados em virtude do alto teor de mercúrio nas águas. O crescente debate levou o movimento a uma área política separada, com uma agenda política própria (NATURVARDSVERKET, 2011).

Em 1967, essas preocupações com a água e o ar induziram o governo a estabelecer duas entidades: a Agência Ambiental e o Conselho Nacional de Licenciamento para a Proteção Ambiental que era, na prática, um tribunal com representantes técnicos da Agência e da indústria suecas (LÖNNROTH, 2010). A Agência (Naturvardsverket) era o órgão central e responsável pelo setor ambiental, incluindo a parte de conservação, e formada pela fusão de diversas autoridades responsáveis por água, qualidade de ar, conservação e outras (NATURVARDSVERKET, 2011).

Já o Conselho era formado por um juiz experiente, dois outros membros com conhecimento e experiência técnica e um quarto membro com experiência industrial ou de governo local. O Conselho decidiria, baseado em avaliações individuais, sobre cada risco ambiental e as formas de impactos operacionais, que poderiam ser regulados em apenas uma licença: a licença integral (LUNDGREN, 2011).

O Conselho de Licenciamento é responsável pelas instalações de grande porte, enquanto as pequenas instalações eram responsabilidade dos conselhos administrativos provinciais. Desde 1990, os menores passaram a ser licenciados pelos municípios. No processo de licenciamento vale destacar: o licenciamento era integrado, com todas as questões de poluição revisadas pelo Conselho na mesma ocasião; a Agência rapidamente desenvolveu capacidade técnica baseada em forte rede de conhecimentos internacional; consenso baseado na ciência foi sendo desenvolvido gradualmente entre a Agência e a indústria; o monitoramento da adequação às normas foi delegado para as próprias indústrias, uma vez que a Agência decidiu, desde o início, confiar na grande indústria e focar na auditoria dos sistemas de controles auto monitorados (LÖNNROTH, 2010).

De acordo com Lundgren (2011), diferentemente de outras experiências em regulação ambiental, ao longo dos anos, a Agência, o Conselho e as empresas desenvolveram uma relação relativamente harmônica. Já para Lönnroth (2010), os aspectos econômicos também tiveram seu papel no sucesso da evolução do sistema, níveis elevados de investimentos produziam melhoramentos mais rápidos ao meio ambiente, já as recessões matavam as velhas e ineficientes unidades industriais.

Em 1969, pouco depois da criação da Agência e do Conselho, a consolidação da legislação ambiental foi publicada: a Lei de Proteção Ambiental, objetivando prevenir poluição nas águas e no ar, ruídos e outras formas de distúrbios causados por indústrias e outras instalações estacionárias. Sob a nova lei, qualquer planta que oferecesse potencial risco ao meio ambiente deveria ter uma licença para operar. Muito embora desrespeitar a Lei de Proteção Ambiental poderia levar a penalidades, essas nunca foram comuns.

A razão para não terem sido aplicadas penalidades se dá pelo fato de a implementação da Lei ser mais baseada na cooperação e no comum acordo entre as empresas e as autoridades. O monitoramento das emissões para assegurar que as emissões atenderiam aos limites acordados era deixado para as próprias empresas. As autoridades apenas supervisionam esse monitoramento próprio e também aconselham melhorias (LUNDGREN, 2011).

Não obstante, o Conselho de Licenciamento é guiado desde o início pela ideia da melhor tecnologia disponível (*Best Available Technology* – BAT), o que significa que as empresas devem usar os equipamentos de controle mais efetivos e as técnicas e processos mais inovadores disponíveis no mercado. Essa abordagem passo a passo provou-se muito efetiva e levou a melhoras ambientais significativas, seguidas por uma reestruturação do mercado.

Inúmeras pequenas empresas com tecnologias obsoletas foram substituídas por poucas, novas e maiores plantas mais eficientes. Ao longo desse processo, o total de emissões de poluentes caiu consideravelmente, a despeito de um crescimento cada vez maior da produção total. Aliado a isso, a Agência também subsidiava tecnologias limpas. Nos cinco primeiros anos da Agência, cerca de 800 milhões de coroas (valores históricos no período de 1969–74) foram concedidos para a aquisição de tecnologias mais novas e limpas (LUNDGREN, 2011).

Na década de 1970, outras substâncias perigosas entraram no foco das políticas ambientais como DDT, pesticidas similares, PCB, entre outros. Em 1973, o Riksdag (parlamento sueco) passou a Lei sobre Produtos Perigosos para a Saúde e o Meio Ambiente. Diferentemente de legislações anteriores, essa nova Lei tratava não apenas da saúde humana, mas também da natureza (LUNDGREN, 2011).

Ao mesmo tempo em que a Suécia começou a controlar substâncias e negócios com altos riscos potenciais ao meio ambiente, focou na melhora do tratamento de esgotos. O apoio do governo central aos Conselhos locais para investimentos em sistemas de água e esgotos, iniciado nos anos 1940, foi melhorado por um amplo esquema de apoio que seguia o princípio “quanto maior a efetividade do tratamento, maior o financiamento do estado”.

Consistiu no maior volume de subsídios ocorridos na Suécia visto até então: em 14 anos (1968-1992) gastou-se 1,9 bilhão de coroas suecas (SEK) em preços históricos. Como resultado, o total de nutrientes descartados das cidades suecas caiu consideravelmente. O fósforo, por exemplo, caiu de 7 mil toneladas no final dos anos 1960 para 360 em 2005 (LUNDGREN, 2011).

Depois de resolvidas as principais questões de contaminações de então, outras questões iam entrando na pauta. Na segunda metade dos 1980, passaram a ser trabalhados: o risco da poluição de larga escala nos ecossistema e nas cadeias alimentares das indústrias internacionais, as quais não estavam sujeitas à legislação sueca, tornando essencial a cooperação internacional; conservação da diversidade biológica pelo impacto ambiental de outras atividades não industriais; impacto das pequenas plantas e capacitação do quadro técnico municipal; clima e demais emissões globais; definição de desenvolvimento sustentável e seu impacto nas políticas ambientais; novo ministério (Ministério do Meio Ambiente, instituído em 1987) e a agência *Swedish Chemicals Agency*; descentralização e empoderamento das autoridades locais; política voltada para o produto (*ecolabelling*); taxas ambientais e de energia; obrigação de inclusão de questões ambientais nas decisões das outras agências (LÖNNROTH, 2010).

Depois do acordo de livre comércio entre a Suécia e a Comunidade Europeia (EC), em 1972, e o Tratado estabelecendo a Área Econômica Europeia, em 1992, a Suécia se juntou, de fato, à União Europeia em primeiro de janeiro de 1995. A partir desta data, o país adotou a legislação da União Europeia, tendo de compilar 15 legislações do país em um único código de meio ambiente, que entrou em validade em primeiro de janeiro de 1999. Além das leis locais, o novo código contemplou todas as diretrizes listadas pela União Europeia (BALTIC ENVIRONMENT AND ENERGY, 2007).

Lönnroth (2010) ressalta, além da entrada da Suécia na União Europeia, o fim da União Soviética e a democratização dos países bálticos como dois eventos importantes para a política ambiental sueca. No fim dos anos 1990, a globalização mudou as políticas ambientais, uma vez que a legislação doméstica se tornou inadequada quando o foco mudou para as características ambientais dos produtos importados, incluindo os impactos das atividades ao longo da cadeia de produção. E mais: as restrições não eram aceitas pela Organização Mundial de Comércio (OMC).

Nesse contexto, o foco mudou do puro licenciamento para o assessoramento e coordenação de outros tomadores de decisão. Naquele momento, a política do clima mudou para um modo mais amigável aos mercados. A responsabilidade do produtor foi introduzida no fluxo dos resíduos e aumentos nos impostos ambientais eram compensados por redução dos impostos de renda (LÖNNROTH, 2010).

Nesse tempo, a estrutura organizacional para política ambiental desenvolveu algumas novas características: as legislações foram reunidas em um Código Ambiental; dissolução do Conselho de Licenciamento e integração do licenciamento de plantas grandes ao sistema judiciário, enquanto plantas médias passaram a ser licenciadas por Conselhos administrativos provinciais; integrações setoriais sistematizadas em instruções do governo para agências designadas. Também incorporado às leis que orientavam as decisões de licenciamento; o desenvolvimento sustentável se tornou o alvo maior do Código Ambiental, desenvolvendo-se um sistema de objetivos de qualidade ambiental pelo governo para oferecer definições mais detalhadas do componente ambiental do desenvolvimento sustentável. Esses objetivos servem de guias para outras agências governamentais, províncias e municípios (LÖNNROTH, 2010).

O resultado dessa regulação tornou o país um dos mais sustentáveis em vários indicadores ambientais. Em 2015, por exemplo, a poluição do ar urbana (PM10) era de 20,1. Porém, apesar dos avanços, o foco do país não busca o que já foi alcançado, mas o que ainda está por ser feito. Para manter esse comportamento, o governo ressaltou o papel da população sueca, pois considera que ela se mostra disposta a se conscientizar a respeito das questões ambientais e defender a qualidade de sua água e ar. Em 2015, uma pesquisa da Standard Eurobarometer apontou que 26% dos suecos considera o clima e o meio ambiente como questões centrais; na União Europeia essa fração é 6% (SWEDEN GOVERNMENT, 2017).

3.2 CLIMA E ENERGIA NA SUÉCIA

Uma das principais questões ambientais da atualidade é a questão climática. Embora as atividades humanas sejam danosas ao equilíbrio ambiental em vários aspectos, a mais relevante, devido tanto à fragilidade do equilíbrio climático quanto à extensão dos possíveis danos, tem sido a questão climática. Desde os primeiros alertas da Organização Meteorológica Mundial (OMM), passando pela criação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas, em 1988, a fundação do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC) e o estabelecimento da Convenção Quadro de Mudanças Climáticas das Nações Unidas (UNFCCC), em 1992, a consciência das causas e consequências das mudanças climáticas tem se espalhando ao redor do mundo.

E a Suécia tem sido uma das lideranças tanto na disseminação dos conceitos como na reunião de esforços para lidar com a questão. A Suécia, por exemplo, foi uma das primeiras nações a assinar e ratificar o Protocolo de Quioto, em 1998 e 2005, respectivamente (SWEDEN GOVERNMENT, 2017). Faz sentido que a Suécia lidere a migração para a economia de baixo carbono, uma vez que muito do caminho já foi percorrido.

De modo similar ao Brasil, o consumo energético do país usa uma grande fração de energias renováveis. Não obstante, as tendências são diferentes. Enquanto a fração do Brasil segue inalterada, na Suécia ela vem aumentando progressivamente. E, de acordo com o relatório de 2013 da Agência Internacional de Energia (IEA, 2013), o país tem conseguido progressos maiores do que as metas de longo prazo, no que diz respeito à busca de uma sociedade baseada em fontes de energia sustentáveis, permanecendo entre as sociedades líderes de baixo carbono, com altas frações de energias renováveis.

A revista *Breakthrough Journal* (JENKINS, 2012) ranqueou os países da OCDE com relação às taxas de descarbonização das economias (emissões de CO₂/PIB), entre 1971 e 2006. A Suécia é líder, com uma taxa de 3,2% anual. Durante o período de 1990-2016, enquanto o PIB cresceu 75%, as emissões caíram 26% como se pode ver na Figura 7, abaixo:

Figura 7 – PIB real da Suécia e emissões domésticas de CO₂ equivalente.

Fonte: Adaptado de Eurostat (2018) e Word Bank (2018).

Em 2013, de acordo com a relatório da Swedish Energy Agency (2015), as energias renováveis representavam 36% da energia total (556 TWh) produzida na Suécia. Entre as fontes renováveis, a mais importante era a de biomassa (que inclui resíduos), com 23%, seguida pela hidroeletricidade (11%) e das eólicas (2%). Embora o total produzido de energia no país alcance 556 TWh, o uso final é bem inferior: 375 TWh. Essa diferença se deve a produtos não energéticos, mas principalmente por perdas em plantas nucleares, que demandaram 123 TWh em 2013 – quase o mesmo montante da energia total produzida por biomassa. Se considerada apenas a energia consumida, a fração das renováveis salta para 53%.

Tal situação é bastante diferente da anterior à década de 1970, quando o petróleo representava aproximadamente 80% da produção de energia primária, o que tornava o país um dos mais dependentes do petróleo no mundo industrializado (SWEDISH ENERGY AGENCY, 2015). Apesar de a eletricidade ser basicamente produzida por conta da hidroeletricidade, os setores de transporte e aquecimento eram totalmente baseados em petróleo.

Já nas décadas de 1950 e 1960, o governo sueco havia demonstrado preocupações com a alta dependência do petróleo importado, mas foi a crise de petróleo, em 1973, que iniciou reais esforços para reduzir a dependência do petróleo importado (ERICSSON, 2009).

Com o crescente debate sobre a exploração de rios para produção de eletricidade, o governo procurava novas alternativas de geração até mesmo para eletricidade. Desse modo, resolveu apoiar a produção de eletricidade por usinas nucleares, sistemas de aquecimentos distritais (*District Heating*) para reduzir o uso de petróleo nos sistemas de aquecimento e de biocombustíveis para uso em transporte. Com esse conjunto de ações, o uso de petróleo reduziu em um terço durante a década (ERICSSON, 2009).

No período de 1974 a 1985, apenas foram construídos 12 reatores nucleares, mudando drasticamente o mix elétrico do país e tornando a sua eletricidade mais competitiva. As usinas nucleares, entretanto, sofreram uma feroz resistência num país com preocupações ambientais tão consistentes. Em 1980, um referendo decidiu que as plantas nucleares deveriam ser encerradas até 2010. Depois do acidente de Chernobyl, em 1986, foi decidido adiantar o banimento das usinas nucleares para 1995. Posteriormente, essa decisão foi revista e até hoje as plantas nucleares têm um importante papel na matriz elétrica sueca (ERICSSON, 2009).

Na mesma década de 1980, outra mudança no mercado energético sueco ocorreu com a entrada do gás natural. Essa participação poderia ser ainda maior se não houvesse uma restrição da infraestrutura de redes. Até hoje, a atual rede alcança apenas a região sudoeste, de Trelleborg a Gotemburgo.

Durante os anos 1990, várias grandes mudanças ocorreram no mercado de energia. A primeira delas, em 1991, foi a reforma tributária do setor. Essa reforma já considerava o princípio da sustentabilidade, uma vez que bem antes de isso se tornar uma tendência, foi criado o imposto sobre carbono. Em 1995, o país se tornou membro da União Europeia, adaptando as suas políticas e normas à Diretiva Europeia. Por outro lado, em 1996, ocorreu a liberalização do mercado de energia, dividindo os setores de geração, transmissão e distribuição. Consequentemente, o mercado do norte da Europa pôde ser gradualmente integrado (ERICSSON, 2009).

Introduzido em 2003, o certificado de eletricidade renovável representa um dos instrumentos para aumentar a fração de energias renováveis no mercado elétrico. O sistema estabelece que para cada MWh de eletricidade produzida por uma planta de energias renováveis certificada, o dono recebe um certificado que tem valor de revenda. Os compradores de certificados de eletricidade são os geradores de eletricidade que têm obrigações de comprar certa fração de certificados de eletricidade renovável em relação a suas vendas ou uso de eletricidade. As cotas anuais são calculadas com base na expectativa de crescimento das energias renováveis, expectativa de vendas de eletricidade e uso de eletricidade por organizações com cotas mandatórias de energias renováveis (SEA 2015).

Desde 2012, a Suécia e a Noruega têm um sistema comum de certificados de eletricidade renovável. Através desse sistema, os países querem alcançar um aumento na produção de renováveis de 26,4 TWh, em ambos os países, no período de 2012-2020. Com a iniciativa, ambos os mercados de renováveis cresceram e os participantes podem comprar certificados além das fronteiras entre os dois países.

Em abril de 2015, uma lei sueca ainda instituiu que o país deve financiar a produção de um adicional de 30 TWh de energias renováveis, em 2020, comparado com 2002 (NVE e SEA 2015). Iniciativas que criaram condições para um contínuo crescimento da capacidade renovável na matriz elétrica do país. A capacidade de produção nos anos de 2013 e 2014 podem ser verificados na Tabela 5, abaixo:

Tabela 5 – Capacidade de geração de eletricidade sueca

Fonte	31 Dez 2013 MW	31 Dez 2014 MW
Hidrelétrica	16.150	16.155
Eólica	4.470	5.420
Nuclear	9,531	9.528
Solar	43	79
Outras térmicas	8.079	8.367
CHP (indústria)	1,375	1,375
CHP, District Heating	3.631	3.681
Plantas convencionais	1.498	1.748
Turbinas a gás etc.	1.575	1.563
Total	38.273	39.549

Fonte: Byman (2016).

Muito embora as emissões suecas representem menos de 0,2% das emissões globais totais, o país tem buscado, não só pelo debate, mas com exemplos concretos, se colocar na dianteira da questão climática. Para tanto, usa como estratégia ir aumentando as suas próprias metas relacionadas a poluição, ar puro, emissões de gases efeito estufa, eficiência energética entre outros. Por exemplo, o país tem trabalhado com as metas de uma redução de 40% das emissões de gases efeito estufa para o ano de 2020 (comparado com 1990) e ter uma frota de veículos completamente livre de combustíveis fósseis em 2030 (SWEDEN GOVERNMENT 2017).

Tais compromissos estão no âmbito da iniciativa europeia *Roadmap 2050*, cujos objetivos consistem em alcançar uma redução de emissões de 80% em todo o continente (comparado com 1990). De acordo com as projeções de 2015, as emissões caíram 16 milhões de toneladas, mas para alcançar os 40% de emissões em 2020, seria necessária uma redução adicional de 20 milhões de toneladas, bastante difícil de alcançar. No longo tempo, entretanto, o Instituto Nacional de Pesquisa Econômica do país considera que há grandes chances de se alcançar uma sociedade livre de emissões em 2050 (SWEDEN GOVERNMENT, 2017).

Com relação à eficiência energética, a meta do governo é tornar o uso da energia 20% mais efetivo, comparado ao ano de 2008. Para alcançar essa meta, o governo tem oferecido incentivos tributários para iniciativas de eficiência energética industrial, orientação para moradores em cada uma das 290 cidades suecas e investimentos significativos em Pesquisa e Desenvolvimento – em 2013, os gastos com este último alcançaram em 3,3% do PIB, a quarta maior porcentagem entre os países da OCDE (SWEDEN GOVERNMENT, 2017).

Em junho de 2017, o país passou uma lei (254 votos contra 41) tornando ainda mais ambiciosas as suas metas climáticas. O ano para alcançar a neutralidade líquida de emissões foi adiantado de 2050 para 2045. A legislação prevê um Conselho de Política Climática independente e atualização do plano a cada quatro anos. Para alcançar a neutralidade, o país foca no transporte, reduzindo as suas emissões em 85%, compensando os 15% restantes com formas de armazenamento de carbono por florestas, no país e no exterior (WONG, 2017)

3.2.1 Regulação em energia

Basicamente, há dois impostos importantes que recaem sobre a energia e formam a base do sistema sueco de taxação do setor. O primeiro deles é propriamente o imposto da energia que recai sobre combustíveis (o imposto iniciou em 1924 sobre a gasolina; em 1937, recaiu sobre o diesel; em 1957, sobre o óleo e carvão para aquecimento; em 1985, sobre o gás natural e, em 2013, para biocombustíveis misturados em gasolina e diesel) e eletricidade (criado em 1951). Os impostos sobre óleo de aquecimento e carvão fizeram parte do esforço no sentido e expandir os sistemas de aquecimento central – *District Heating* (ÅKERFELDT, 2016).

Em 1991, por outro lado, a Suécia alterou esse imposto sobre energia diminuindo a sua base, mas estabelecendo outro critério adicional: as emissões de gases poluentes. Nesse sentido, o imposto mais importante é sobre a emissão de dióxido de carbono, e há também impostos sobre compostos de enxofre e nitrogênio, além de outros valores adicionais específicos para eletricidade e combustíveis.

Esses impostos têm tanto propósito fiscal quanto ambiental e são cobrados de usuários de todos os tipos de combustíveis para motores ou aquecimento, com exceção da maioria dos biocombustíveis. O imposto sobre carbono vem aumentando ao longo dos anos, sendo cobrado o valor de 0,25 SEK por kg no início e chegando, em 2015, a 1,20 SEKs por kg CO₂. Essas taxas, entretanto, são menores para alguns setores, como a indústria manufatureira, a agricultura e a indústria florestal. O imposto de carbono é baseado no conteúdo de carbono de todos os combustíveis (a quantidade emitida de dióxido de carbono), exceto para biocombustíveis e turfa. Regras especiais se aplicam para a indústria eletrointensiva e diesel em indústrias rurais (IEA, 2017).

Em 2014, no que se refere ao imposto de energia em eletricidade, os impostos que incorrem em processos industriais e outros negócios é o valor mínimo permitido pela Diretiva de Impostos em Energia da União Europeia (2003/96/EC): ou seja € 0,5 MWh. Enquanto o imposto de energia para a maioria dos usuários residenciais de energia elétrica, em 2016, era 0,292SEK por kWh ou, aproximadamente, € 0,03 por kWh. A receita obtida pelo governo com esses impostos representa aproximadamente 4 % de toda a receita do governo (IEA, 2017).

O imposto sobre enxofre é aplicado onde essas emissões são medidas ou pelo conteúdo de enxofre do petróleo usado. Para óleo pesado ou diesel, o imposto é cobrado sobre 0,1% do peso e para coque, carvão e turfa, os valores são cobrados sobre kg de conteúdo de enxofre. Se os compostos de enxofre são removidos dos gases de exaustão, o imposto é devolvido de acordo com a quantidade (kg) de remoção (IEA, 2017).

Com relação ao imposto de carbono, não há medição das emissões e o cálculo é baseado na média de emissões e nos fatores de energia. Os cálculos são expressos na lei, em peso ou em volume, para diferentes combustíveis. O imposto de CO₂ é coletado da mesma forma que o imposto de energia, de modo a manter os custos administrativos baixos para as autoridades tributárias e também para os operadores (ÅKERFELDT; HAMMAR, 2015).

Muito embora tenha se iniciado no mesmo nível, o imposto sobre carbono se tornou diferente para consumidores padrões e para indústrias como indústrias manufatureiras, agricultura, plantas de cogeração, indústria florestal, e aquicultura, como pode ser verificado na Figura 8:

Figura 8 – Imposto de carbono ao longo dos anos

Fonte: Sumner *et al.* (2009, p. 11).

A introdução desse imposto de carbono fez parte de uma reforma tributária maior que, entre outras coisas, reduziu o imposto de renda para capital e trabalho, eliminou isenções e ampliou a base tributária sobre valor adicionado. Foi uma oportunidade política voltada para alcançar dois objetivos: de um lado, reduziu-se imposto de renda que havia alcançado níveis muito altos; de outro lado se atendia às questões ambientais que vinham alcançando grande interesse por parte da sociedade sueca (ÅKERFELDT, HAMMAR H., 2015).

No período de 2007 a 2013, o governo aumentou os impostos ambientais que recuperaram cerca de €0,6 bilhões, assim como cortou impostos trabalhistas que liberaram cerca de €8,6 bilhões na economia (ÅKERFELDT, 2016).

Em 2009, o governo decidiu aumentar o imposto de energia em dois passos para um total de 0,40 SEK por litro. A primeira parte foi implementada a partir de primeiro de janeiro de 2011, aumentou-se os primeiros 0,20 SEK; e na segunda fase, os restantes 0,20 SEK, a partir de primeiro de janeiro de 2013 (INTERNATIONAL ENERGY AGENCY, 2017).

Em função do Esquema Europeu de Comércio de Emissões (EU *Emissions Trading Scheme* (EU ETS), um vasto instrumento de comercialização de emissões de gases efeito estufa existente na União Europeia, as indústrias suecas submetidas a esse esquema (indústrias energointensivas), a partir de 2011, deixou-se de cobrar impostos desse grupo de indústrias participantes, uma vez que eles já se comprometeriam com a redução das emissões e pagariam pelas mesmas (ÅKERFELDT; HAMMAR H, 2015).

Em 2016, conjuntamente, os valores totais das receitas com os impostos de energia e carbono alcançaram 1,6 % do PIB e 3,6% do total das receitas de impostos no país. Os números absolutos podem ser conferidos na Tabela 6:

Tabela 6 – Receitas suecas de impostos de energia e carbono em 2016

	Receitas em bilhões de €
A) IMPOSTO DE ENERGIA	4,66
Eletricidade	2,24
Gasolina	1,25
Outros combustíveis fósseis além da gasolina	1,18
B) IMPOSTO DE CARBONO	2,47
Gasolina	0,85
Outros combustíveis fósseis além da gasolina	1,62
Total (A+B)	7,13

Fonte: Åkerfeldt (2016).

A partir de 1 de fevereiro de 2013, biocombustíveis misturados a gasolina e diesel, em misturas acima de 5%, eram isentos do imposto sobre carbono e do imposto de energia, na medida da sua proporção em peso nos combustíveis. O E85 (etanol 85%) e outros combustíveis com alta mistura de biocombustíveis são inteiramente isentos dos impostos de carbono e energia na proporção em que se dá a mistura (IEA, 2017).

3.2.2 District Heating na Suécia

O sistema de aquecimento central (*District Heating*) é bastante importante na Suécia. Em 2013, foi responsável por 58% do uso energético de residências e instalações não residenciais. Aproximadamente metade do calor gerado em *District Heating* é usado por prédios com mais de duas residências, enquanto as instalações não residenciais consomem 38% desse calor e casas de uma ou duas residências consomem 12% (SWEDISH ENERGY AGENCY, 2015).

Em 1948, foi construída a primeira instalação de *District Heating* da Suécia, em Karlstad, e a rápida expansão da população no pós-guerra exigiu dos municípios a construção de uma nova infraestrutura de prédios que contemplavam o sistema (MAGNUSSON, 2010). Entre a metade dos anos 1960 e a metade da década seguinte, desenvolveu-se o Programa Milhão Sueco, com a construção de um milhão de apartamentos para corrigir a falta de residências no país. Enquanto (principalmente) os municípios construíam esses novos edifícios, expandia-se os sistemas de aquecimento centralizado, ligando consumidores a empresas municipais de energia. O processo continuou no período subsequente, embora sem o mesmo ritmo e escala. Os sistemas foram crescendo e se interconectando, principalmente em áreas metropolitanas, como a Grande Estocolmo, muito em função das vantagens econômicas oferecidas em se alcançando uma escala intermunicipal ou regional (MAGNUSSON, 2010).

Mesmo recentemente o crescimento é contínuo. A proporção de aquecimento distrital gerado a partir de plantas de cogeração subiu de 30% para 40% entre 2003 e 2013. As melhorias tecnológicas também proporcionaram uma queda nas perdas de conversão e distribuição ao longo dos anos. Na década de 1990, essas perdas estavam na casa dos 17%, já na década seguinte, as perdas médias caíram para 10%. Muitos combustíveis podem ser usados para *District Heating*, e uma grande mudança para combustíveis renováveis ocorreu na década de 1970, quando biomassa ocupou espaço do óleo importado (SEA, 2015).

Em 2013, a biomassa, que inclui resíduos orgânicos (enquanto a fração fóssil é considerada outros combustíveis), contribuiu com 60% do aquecimento, enquanto 8% vem de calor residual no mercado de *District Heating*. O uso de resíduos cresceu durante os anos 2000, e hoje é usado como base do aquecimento em várias cidades suecas. O crescimento deveu-se à proibição de aterramento de resíduos combustíveis a partir de 2002 e de resíduos orgânicos a partir de 2005 (SWEDISH ENERGY AGENCY, 2015).

As tarifas de *District Heating* variam de acordo com a propriedade e estrutura da companhia que provê o serviço, requisito de renda, combustíveis usados, condições geográficas e a idade das instalações. Por exemplo, no ano de 2014, a cidade de Luleå tinha a tarifa de aquecimento mais baixa, de 94 SEK/m² para um apartamento de um prédio, enquanto a cidade de Mörbylånga tinha o maior preço 201 SEK/m² (SWEDISH ENERGY AGENCY, 2015).

Atualmente, não há requerimentos regulatórios governamentais para o setor de aquecimento centralizado. Não obstante, desde 2015, a Agência Sueca de Energia trabalha com a avaliação da capacidade financeira das empresas de *District Heating* para lidar com mudanças significativas do ambiente. A Agência deve também analisar a capacidade de prevenir e remediar interrupção no abastecimento de calor (SWEDISH ENERGY AGENCY, 2015).

Os sistemas de esfriamento centralizado (*District Cooling*) também estão crescendo com os mesmos princípios do (*District Heating*) que envolvem a produção de água fria em plantas grandes para a sua distribuição em tubulações para os consumidores. O método mais comum de produção usa calor residual ou água do mar para produzir frio com ajuda de máquinas de refrigeração e na maioria das vezes ocorre simultaneamente com a produção de calor.

Na Suécia, é usado principalmente em escritórios e instalações de negócios e processos industriais. O Mercado de *District Cooling* tem se expandido consideravelmente, desde a sua primeira planta, construída em 1992. Em 2014, um total de 35 empresas geraram 1.013 GWh de *District Cooling* (SWEDISH ENERGY AGENCY, 2015). Atualmente, o controle dos sistemas de *District Heating* se dá na sala de controle da CHP. Tudo de modo informatizado, como na planta de incineração de Torsvik, na cidade de Jönköping, conforme mostra a Figura 9:

Figura 9 – Monitor de sontrolre sobre o sistema de *District Heating* da cidade de Jönköping

Fonte: O autor, (2017)

3.3 GESTÃO DE RESÍDUOS NA SUÉCIA

A consciência referente ao impacto do lixo urbano não é muito antiga na Suécia. Embora já em 1938, o jornalista Ludvig Nordström tenha lançado uma série de reportagens na rádio pública sueca, a “A Suécia Suja”, demonstrando as baixas condições de vida no país, especialmente no campo, em função do lixo, as primeiras reais iniciativas para lidar com o lixo iniciaram-se apenas nos anos 1960 (BALTIC ENVIRONMENT AND ENERGY, 2007).

Em 1962, a Sociedade para Conservação da Natureza lançou a campanha “Mantenha a Natureza Limpa”, que focou no esforço para mudança de comportamento das pessoas com relação ao jogar o lixo no chão. Nessa época, tornou-se compulsória a coleta de lixo tanto nas casas permanentes como nas casas de verão (BALTIC..., 2007). Lixo fora de lugar, nessa época era basicamente o foco das iniciativas.

Há um curioso filme de orientação ao público de como lidar com lixo em barcos, datado de 1964 (SVERIGE TELEVISION, 1964). O filme indica como positiva uma ação que se tornaria bastante condenável poucos anos depois. Ele ensina as pessoas a reunirem o lixo, embalem junto com uma pedra para que ele afunde e não pare nas praias. Tal vídeo demonstra que a preocupação básica era com o lixo aparente (nas ruas e praia), mas não com a destinação final.

Já na década seguinte, a gestão de resíduos no país se desenvolveu bastante. No início da década, em 1972, “A Lei de Limpeza Pública” entrou em vigor e se tornou um marco na gestão de resíduos sólidos urbanos. De acordo com a lei, a responsabilidade pela limpeza pública, coleta e transporte de lixo doméstico ficou a cargo das prefeituras. A lei foi o marco inicial também com relação à destinação dos resíduos. Entre 1972 e 1982, foram construídas entre 15 e 20 novas plantas de separação e compostagem (RYLANDER, 1985).

Em 1975, o governo sueco passou a lei “Recuperação e Gerenciamento de Resíduos”, o que resultou em apoio de mais de 50% do custo de capital de plantas de recuperação ou outra forma de utilização do lixo doméstico. A lei iniciou a recuperação e reciclagem de restos de papéis – primeiramente de jornais e revistas das residências (RYLANDER, 1985).

Motivado também pelo impacto da crise do petróleo de 1973, o estado sueco decidiu apoiar programas de investimentos focados no desenvolvimento da recuperação do potencial energético ou outros usos dos resíduos domésticos. O programa foi introduzido em 1975, ao mesmo tempo em que se implantavam os sistemas de aquecimento centralizado (*District Heating*) que aproveitavam o calor das plantas incineradoras. Em 1979, os municípios se tornaram responsáveis também pelo tratamento dos resíduos sólidos (CORVELLEC; BRAMRYD; HULTMAN, 2011).

A partir da campanha “Sociedade mais Limpa”, focada também na questão do lixo na rua entre 1970 e 1974, organizada pelo comitê nacional “Mantenha a Suécia Arrumada”, com apoio de comitês regionais, criou-se uma fundação, em 1983, que, apoiada pelo Conselho Nacional de Proteção Ambiental e por uma companhia de reciclagem (*Swedish Recycling*), iniciou programas de reciclagem no país. A fundação era financiada basicamente pela reciclagem lucrativa de latas de alumínio (BALTIC..., 2007).

Esses esforços fizeram com que, durante a segunda metade da década de 1970, os aterros se reduzissem de aproximadamente 800 (1974) para pouco mais de 400 (1980). Os aterros remanescentes tinham de ser comprovadamente mais bem operados, sob ponto de vista ambiental, com coleta e purificação de chorume (RYLANDER, 1985).

Apesar dos primeiros esforços, por um longo período grande parte dos resíduos (incluindo industriais) era disposta em aterros. Na década de 1980, as coisas mudaram mais intensamente também por conta da dificuldade de encontrar locais apropriados para a disposição de resíduos (LUNDGREN, 2011).

Durante a década de 1980, a incineração dos resíduos com recuperação energética foi desenvolvida em larga escala especialmente para substituir o petróleo e o carvão no sistema de aquecimento centralizado (*District Heating*). Ao mesmo tempo, alguns segmentos manifestaram preocupação com as emissões de dioxinas nas plantas de incineração, o que levou a um debate e forçou o governo sueco a suspender o desenvolvimento de novas plantas de incineração, em 1985 (NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY, 1995).

A moratória de novas plantas foi estabelecida em 13 de fevereiro de 1985 pela Agência Ambiental Sueca, e foi motivada por relatórios que mostravam que as incineradoras eram fontes importantes de dioxinas e dados obtidos em 1984 mostraram a presença de dioxina no tecido adiposo e em leite materno. No momento da moratória, mais da metade dos resíduos sólidos urbanos já eram incinerados (NATIONAL..., 1995).

Em maio de 1985, o governo começou a estudar requisitos de engenharia e limites de emissões que deveriam ser impostos à incineração de resíduos. O resultado da investigação gerou o relatório “Energia de Resíduos”, publicado em junho de 1986, que concluiu que a incineração era um método confiável de tratar resíduos domiciliares e industriais. A conclusão, entretanto, ressaltou a necessidade de implementar medidas para restringir as emissões das plantas futuras e que já existiam. O relatório baseou a decisão do governo de suspender a moratória, que, por sua vez, determinou que a agência ambiental deveria trabalhar para assegurar que as plantas existentes cumprissem a restrição sugerida pelo relatório até o fim de 1991 (NATIONAL..., 1995).

Em seguida, a Agência Ambiental reviu todas as licenças e as condições necessárias para atender as normas delineadas pelo relatório e estabelecer os limites para dioxinas e furanos variando de 0.1 to 2 mg/m³ (em EADON TCDD equivalente) (NATIONAL..., 1995).

As preocupações com resíduos também levaram a uma maior separação na fonte, que teve um grande avanço nos anos 1980. O governo sueco focou na reciclagem e no reúso, possibilitando que materiais pudessem ser recuperados do lixo e evitando que resíduos perigosos fossem descartados (LUNDGREN, 2011; CORVELLEC; BRAMRYD; HULTMAN, 2011).

Na metade dos anos 1980, entretanto, a reciclagem ainda iniciava seu crescimento, aproximadamente 40-45% do total de resíduos sólidos era aterrado, aproximadamente 45-50% era incinerado e somente 10% era separado ou compostado em plantas centrais (RYLANDER, 1985).

Em 1988, a Agência Ambiental, por exemplo, lançou um relatório chamado “Resíduos Sólidos e Meio Ambiente”, que estabelecia uma estratégia para atingir certas metas, em termos de proteção da saúde e meio ambiente, economizar recursos naturais, impulsionar desenvolvimento econômico, proteger materiais estratégicos, eliminar lixo na rua, garantir coleta apropriada, tratamento e disposição de materiais indispensáveis, minimizar a produção de resíduos, reciclar o quanto for econômica e tecnicamente possível, e tratar o resíduo restante de forma ambientalmente responsável (NATIONAL..., 1995).

Em 1990, o parlamento sueco aprovou a Estratégia Nacional de Gestão de Resíduos com esses objetivos. De 1991 em diante as prefeituras precisavam ter um plano de ação para tratar os resíduos, considerando o material residual encontrado nos seus territórios como resíduos. Esses planos deveriam ser detalhados, incluindo informações referentes aos resíduos e às medidas do município para reduzir a quantidade e risco dos resíduos. Os planos deveriam seguir metas baseadas nos objetivos nacionais. Os planos municipais deveriam ser coordenados pelas administrações provinciais que, por sua vez, analisariam as capacidades de tratamento de resíduos municipais para garantir a capacidade de toda a região (CORVELLEC; BRAMRYD; HULTMAN, 2011).

Em 1994, o parlamento estabeleceu o princípio do poluidor pagador, introduzindo o esquema da “responsabilidade do produtor” que exige metas quantificáveis de coleta e disposição de resíduos para produtores e importadores de bens de consumo, embalagens, veículos, papel de jornal e revista, pneus inservíveis e equipamentos eletroeletrônicos (LUNDGREN, 2011; CORVELLEC; BRAMRYD; HULTMAN, 2011).

No período de 1994 a 1998, várias deliberações de responsabilização de uma gama de materiais (embalagens, papel, óleo, etc.) foram publicadas, impondo responsabilidade física e econômica para a coleta e disposição de certos produtos no fim do seu ciclo de vida. Essas medidas criaram condições para um reuso sustentável, reciclagem ou segura disposição de materiais e foram introduzidas antes da União Europeia estabelecer suas regras de “responsabilidade do produtor” (NATURVARDSVERKET, 2005).

A “responsabilidade do produtor” fez com que as empresas criassem estratégias para a logística reversa de suas embalagens. Um dos exemplos dessa estratégia são os pontos de retorno de latinhas e garrafas de plástico dentro dos supermercados e pontos de venda, como se pode ver na Figura 10, abaixo:

Figura 10 – Ponto de entrega de latas e garrafas PET usadas

Fonte: O autor.

Em 1988, a legislação sueca enfrentou um grande desafio com a entrada em vigor do Código Ambiental, especialmente do capítulo 15, sobre gestão de resíduos, formulando regras explícitas para todas as autoridades relevantes. Em 1999, estabelece-se a lei de imposto sobre resíduos (1999:673) e aterramento, que entra em vigor em primeiro de janeiro de 2000, com valor de 250 SEK por tonelada de resíduos (aproximadamente €27,5).

Em 2002, o valor subiu de to 288 SEK/tonelada (aproximadamente € 31,7); e em 2006, para 370 SEK/tonelada (aproximadamente € 40.7), em 2003, e chegou a 435 SEK/tonelada (aproximadamente € 47,9), resultando num crescimento de quase 74 % desde a sua introdução no ano 2000 (NATURVARDSVERKET,2010). Segundo a lei de imposto sobre resíduos, todo o material que entra no aterro é taxado, enquanto o material que é desviado do aterro recebe dedução. A taxa é cobrada pelo proprietário do aterro e com base no peso (SWEDEN GOVERNMENT, 1999).

Em 2001, o governo sueco lançou a deliberação sobre resíduos (2001:512) que proíbe o aterramento de resíduos combustíveis (de 2001 em diante) e proíbe o aterramento de todo o resíduo orgânico (a partir de 2005), com apenas algumas exceções (ETC/SCP, 2009). Desse modo, o governo determinou o fim do aterramento tanto de resíduos combustíveis como de orgânicos, a partir de 2005, ou ao menos para minimizá-los ao mínimo volume que não possa ser tratado de outra forma.

Não obstante, em certas regiões do país com falta de estruturas para gerenciar apropriadamente o tratamento de resíduos orgânicos ou combustíveis, o conselho da província na qual estão inseridas estas regiões específicas tem o direito de assegurar isenção da proibição (NATURVARDSVERKET, 2005).

De 2001 em diante a gestão de resíduos evoluiu de forma constante, embora com alguns altos e baixos, a reciclagem aumentou 10% em média entre os anos 2001 e 2010. A reciclagem de materiais tem sido alta em função principalmente dos esforços anteriores, que estabeleceram um esquema operacional e bem organizado de atribuições das responsabilidades junto aos produtores de diferentes produtos.

O ano de 2005 foi importante para a visão de futuro da gestão de resíduos no país, porque foi apresentado o Plano de Resíduos do País “Estratégia para Gestão Sustentável dos Resíduos” para os cinco anos posteriores (NATURVARDSVERKET, 2005). Ao mesmo tempo, o governo publicou Objetivos Ambientais, incluindo a redução de Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). Uma meta desafiadora foi a reciclagem de 50% dos RSUs, já para 2010, o que foi praticamente alcançado (MILIOS, 2013)

Em 2006, um imposto sobre incineração foi introduzido com a intenção de propiciar maior direcionamento de resíduos para a reciclagem, mas esse imposto foi revertido em 2010 pelo governo. Durante a década de 2000, também ocorreram mudanças referentes a resíduos industriais e perigosos. O monopólio municipal de tratar resíduos industriais terminou em 2000, e foi desregulado e aberto para atores privados em 2007 (CORVELLEC; BRAMRYD; HULTMAN, 2011).

Ao longo da história, o último e pior recurso da hierarquia de resíduos – o aterramento – foi sendo reduzido até o tratamento de uma quantia irrelevante de resíduos sólidos, por causa de iniciativas regulatórias importantes, como se pode verificar na Figura 11:

Figura 11 – Resíduos sólidos urbanos destinados a aterros (toneladas)

Fonte: Gripwall (2017).

3.3.1 Regulação atual em Resíduos Sólidos

Na Suécia, há vários processos de licenciamento e permissão, planejamento de atividades, medidas de monitoramento e sanção. Porém, o mais importante é que o país também usa instrumentos econômicos para incentivar o comportamento ambientalmente mais desejado. Por exemplo, impostos sobre dióxido de carbono (CO_2) e dióxido de nitrogênio (NO_2), sobre emissões de enxofre, assim como diferentes taxas sobre combustíveis como o diesel são usadas para reduzir a fração de diesel nos combustíveis (NATIONAL..., 1995).

A responsabilidade para fazer valer as leis ambientais são divididas entre o governo nacional, as autoridades regionais e os próprios municípios. Muito embora a autoridade central responsável pela proteção ambiental na Suécia seja a sua Agência de Proteção Ambiental (*Natutvardsverket*), a maior parte das decisões acerca de aspectos que recaem na questão ambiental é realizada por outros atores, o próprio Parlamento, o Conselho de Controle de Produtos, o Conselho de Franquias para a Proteção Ambiental e as autoridades provinciais e municipais.

Além disso, a Agência Ambiental usa meios indiretos de controle e influência por meio de esforços cooperativos com outras organizações. As maiores responsabilidades da Agência Ambiental são executar as decisões governamentais, monitorar novos desenvolvimentos tecnológicos e propor mudanças em regulações ambientais. E é responsável por todas as matérias ambientais sob a Lei de Proteção Ambiental (com exceção das matérias que a Lei específica como responsabilidades de outras instituições), controle de produto (o Conselho de Controle de Produto está ligado à Agência), conservação de patrimônio natural, recreação ao ar livre e pesquisa (NATIONAL..., 1995).

No caso específico das plantas de gestão de resíduos, o governo central estabelece normas com limites de emissões, os quais são então incorporados às licenças individuais de cada planta (NATIONAL..., 1995).

A administração provincial de cada uma das 24 províncias também é responsável por vários aspectos da gestão ambiental, como uma autoridade de supervisão regional, sob a Lei de Proteção Ambiental e a Lei de Proteção de Saúde. Eles são, junto a Inspetoria de Trabalho, a autoridade supervisora sob a Lei de Produtos Perigosos para a Saúde e Meio Ambiente (NATIONAL..., 1995).

Com relação às licenças ambientais, por exemplo, as atividades das companhias de gerenciamento de resíduos são sujeitas, em função do seu significativo potencial impacto ambiental, ao processo de licenciamento. Há duas organizações que emitem tais licenças, dependendo do tamanho da planta de resíduos: o Conselho Administrativo da Província (*Länsstyrelsen*) ou a Corte do Meio Ambiente (*Miljödomstolen*).

Essas licenças são restritas e estabelecem limites de peso de resíduos que podem transitar, ser processados, tratados ou aterrados, por exemplo. As licenças também regulam emissões, chorume e outros rejeitos. Corvellec, et al (2011) salientam que essas licenças, por outro lado, atestam competência que podem ser apresentadas em leilões ou licitações.

Além disso, as 290 prefeituras têm a responsabilidade local para a conservação da natureza. Os comitês de ambiente urbano, construções e saúde são os principais atores com relação às atividades de proteção ambiental e atuam como uma autoridade local, sob a Lei de Proteção da Saúde, Lei de Produtos de Risco à Saúde e Ambiente e a Lei de proteção Ambiental, se as províncias assim delegarem. Mas o mais importante é que as prefeituras estão a cargo da Gestão de Resíduos (NATIONAL..., 1995).

As prefeituras lidam com sua responsabilidade de diferentes formas e elaboram sua própria forma de organização da gestão de resíduos. Com relação à coleta de resíduos, 25% têm sua própria operação, 71% contratam operadores privados e 4% combinam as duas alternativas. Já com relação ao tratamento dos resíduos municipais, 35% usam sua própria operação e 65% contratam outros operadores que, na maioria das vezes, os sócios são também municípios (GRIPWALL, 2017).

A legislação sueca sobre compras governamentais rege contratos com provedores de serviços externos, sejam privados ou públicos. A empresa (privada ou pública) pode oferecer serviços para mais de uma cidade, mas por processos de licitação, de acordo com a Lei 1991:900. Uma vez que de propriedade municipal, as empresas também são sujeitas a controle político. As prefeituras estabelecem diretivas, que definem os objetivos da empresa, mas cujos conselhos são politicamente apontados (CORVELLEC; BRAMRYD; HULTMAN, 2011).

O gerenciamento de resíduos é também regulado com relação às práticas de preços. As empresas municipais precisam seguir o primeiro preço, evitando superar o do custo de serviço. Elas não são autorizadas a se envolver em atividades competitivas com outras com preços menores, a partir do subsídio cruzado assegurado por recursos obtidos de atividades reguladas. Esse processo é monitorado pelos proprietários municipais, competidores e autoridades voltadas a assegurar a competição justa (CORVELLEC; BRAMRYD; HULTMAN, 2011).

Nesse sentido, as empresas têm de traçar seus sistemas contábeis distinguindo custos e receitas para cada município. Para assegurar a separação, devem, inclusive, separar fisicamente seus resíduos pela origem, embora no processo, a composição das cadeias de resíduos seja a mesma (CORVELLEC; BRAMRYD; HULTMAN, 2011).

As prefeituras também podem cobrar uma taxa dos usuários para apoiar as suas atividades voltadas aos resíduos e, ao mesmo tempo, incentivar os usuários a melhor separar os seus resíduos. A média anual das taxas é €250 para casas e €150 para apartamentos (GRIPWALL, 2017).

3.3.2 Estágio atual da Gestão de Resíduos na Suécia

Na Suécia, a gestão de resíduos está efetivamente avançando na direção dos estágios superiores na hierarquia de resíduos. A coleta separada de resíduos alimentares aumentou 5% entre 2013 e 2014. Mais de 65% das prefeituras (190 das 290) coletam resíduos alimentares separadamente no país. Até 2020, o país busca a meta de alcançar 50% de separação na fonte de restos alimentares.

Em 2014, os números eram de cerca de 31%. Esses resíduos separadamente coletados na fonte estão deixando de ser tratados apenas por compostagem e aumentando a produção de energéticos no país. De 2013 para 2014, enquanto a destinação para plantas de digestão anaeróbica cresceu 21% as plantas de compostagem receberam 16% menos resíduos alimentares (AVFALL SVERIGE, 2017).

Em 2013, a reciclagem cresceu cerca de 10%, grande salto ocorreu em função de uma melhora na reciclagem de pedras, vidro, lã, telhas, solos, e tijolos que passaram a ser usados em materiais de construção. Nos anos seguintes, a quantidade reciclada permaneceu mais ou menos estável (AVFALL SVERIGE, 2017).

Apesar dos esforços de subir na hierarquia de serviços, é nos degraus mais altos (que previnem resíduos) que se encontram os principais desafios. De 2012 a 2016, a geração de resíduos no país subiu cerca de 6%. A geração de resíduos por cidadão no período também cresceu de 460 kg anuais para 467 kg. Em 2016, 34,69% dessa quantidade de resíduos gerada; 16,25% passou por tratamento biológico (digestão anaeróbica ou compostagem) e 49,39% teve sua energia recuperada por meio de incineradores térmicos. Os números totais podem ser checados nas tabelas 7, 8 e 9:

Tabela 7 – Destinação e tratamento final de RSU na Suécia

VOLUME TRATADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS 2012-2016 (TON)					
	2012	2013	2014	2015	2016
Reciclagem	1.422.250	1.467.200	1.617.930	1.652.710	1.615.170
Tratamento biológico	673.180	711.450	713.110	728.570	757.480
Recuperação Energética	2.270.650	2.235.930	2.148.640	2.284.210	2.262.610
Aterros	32.600	33.300	32.900	38.300	31.000
Volume total tratado	4.398.680	4.447.880	4.512.580	4.703.790	4.666.260

Tabela 8 – Destinação e tratamento final de RSU na Suécia

VOLUME TRATADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS 2012-2016 (KG/PESSOA)					
	2012	2013	2014	2015	2016
Reciclagem	149	152	166	168	162
Tratamento Biológico	70	74	73	74	76
Recuperação Energética	238	232	221	232	226
Aterros	3	3	3	4	3
Volume Total Tratado	460	461	463	478	467

Tabela 9 – Destinação e tratamento final de RSU na Suécia

VOLUME TRATADO DE RESÍDUOS SÓLIDOS URBANOS 2012-2016 (%)					
	2012	2013	2014	2015	2016
Reciclagem	32,3	33,0	35,9	35,1	34,6
Tratamento Biológico	15,3	16,0	15,8	15,5	16,2
Recuperação Energética	51,6	50,3	47,6	48,6	48,5
Aterros	0,7	0,7	0,7	0,8	0,7

Fontes das Tabelas 7, 8 e 9: Avfall Sverige (2017).

Os dados são compilados pela Avfall Sverige, a associação que congrega empresas dedicadas à gestão de resíduos e prefeituras. O sistema de informação de dados é usado pelas prefeituras como forma de comparação de desempenho (*benchmarking*), desenvolvimento e estatística. O sistema é abastecido pelas prefeituras e pelas companhias de gestão de resíduos.

No atual sistema de gerenciamento de resíduos da Suécia, as prefeituras são responsáveis por qualquer resíduo gerado por cidadãos residentes em seus territórios que não estejam cobertos pelo sistema de responsabilidade do produtor (logística reversa). As prefeituras também são responsáveis por resíduos de restaurantes, lojas e escritórios. A responsabilidade inclui transporte para plantas de reciclagem ou disposição em aterros. Está sendo estudada a utilização da infraestrutura de coleta para embalagens. Estas ainda estão sob a responsabilidade do produtor. Contudo, mesmo no caso de se repassar a atividade de coleta de embalagens, os produtores arcarão com os custos.

Toda cidade deve ter a sua própria ordem de resíduos e saneamento, que consiste em um plano e um marco regulatório para saneamento e resíduos. O plano deve incluir o modo que a prefeitura utilizará para diminuir a quantidade e melhorar o gerenciamento de resíduos.

A organização e o modo de gestão será uma decisão do município, já que a própria constituição do país assegura autonomia ao poder local. Há muitas estruturas organizacionais disponíveis: organização e administração própria, empresas municipais, unidas ou independentes, conselhos unidos e associação de municípios.

De acordo com a cultura sueca, a colaboração entre prefeituras diferentes é naturalmente aceita, assegurando benefícios sociais e ambientais mútuos, custos menores e maior competência. Em 71% dos municípios suecos, a coleta de sacos e lixeiras é realizada por operadores privados, 25% realizam por si mesmas as atividades e o restante tem um regime misto.

O sistema de responsabilidade do produtor cobre papéis recicláveis, embalagens, resíduos elétricos, equipamentos eletrônicos, pneus inservíveis, carros, baterias e produtos farmacêuticos. A lista de tratamentos para estes congrega também: reciclagem material que reduz impacto ambiental ao mesmo tempo que economiza energia e recursos naturais; tratamento biológico, que recupera nutrientes para o solo, seja via digestão anaeróbica – que ainda produz biogás – seja via compostagem; recuperação energética – apropriada para resíduos que não possam ser reciclados – recuperando calor e gerando eletricidade; e aterramento para resíduos que não possam ter os destinos anteriores e precisam ser armazenado de maneira segura por um longo período.

O sistema mais comum de coleta na Suécia são as lixeiras separadas (uma para resíduos alimentares e outra para resíduos combustíveis), mas há também outros sistemas, como os resíduos multicompartimentados e sistemas óticos de separação, nos quais sacolas com diferentes cores são colocadas na mesma lixeira e depois separadas por sistemas óticos nas plantas de tratamento. Muitas prefeituras têm pontos de coletas dedicados a embalagens e papéis de jornais e revistas, como a da cidade de Borås, na Figura 12:

Figura 12 – Ponto de Coleta da Cidade de Borås

Fonte: O autor.

Na maioria das residências, as embalagens são separadas em duas lixeiras de quatro compartimentos. Uma lixeira, coletada toda semana, é dividida em: restos de alimentos, resíduos combustíveis, embalagem de papel e vidro colorido; a segunda, recolhida com menos frequência (quatro semanas), é carregada de vidro transparente, metais, plástico de embalagem, jornais e revistas.

Os tradicionais caminhões de lixo com carregamento atrás ainda são os veículos mais comuns para a coleta de resíduos, mas aqueles com vários compartimentos e tecnologias mais avançadas estão sendo cada vez mais utilizados. Além disso, a grande maioria usa combustíveis de baixo carbono como biogás ou biodiesel. Em vários lugares, o manejo manual de resíduos foi substituído por sistemas automatizados, evitando riscos e ferimentos para os trabalhadores.

Entre os sistemas tecnológicos mais avançados estão os que usam a coleta a vácuo no subsolo, principalmente utilizado nas áreas recém-construídas. Há duas formas de coleta a vácuo: a estacionária e a móvel. Uma usa caminhões para remover os resíduos num terminal e a outra conecta, via dutos, a um ponto de acoplamento.

Os sistemas de containers subterrâneos também são inovadores e reduzem os espaços necessários e o odor dos resíduos, uma vez que a temperatura subterrânea, no calor, é mais baixa que a da superfície. Na Suécia, existem aproximadamente 590 centros de reciclagem onde os cidadãos podem colocar os seus resíduos maiores, lixo eletrônico e perigosos (AVFALLS VERIGE, 2015), como o da cidade de Kil da Figura 13:

Figura 13 – Centro de Reciclagem do município de Kil

Fonte: O autor (2017)

3.4 PLANTAS DE INCINERAÇÃO (WASTE-TO-ENERGY) NA SUÉCIA

De acordo com Williams (2011), a Suécia é bem conhecida por sua capacidade de recuperar energia dos resíduos por meio da incineração não apenas por sua grande fração de resíduos tratados pela tecnologia, mas porque, ao contrário dos EUA que estagnou o crescimento no promissor período de 1970-1980, o país continuou adicionando capacidade de tratamento térmico com recuperação energética.

A Suécia iniciou a recuperação energética de resíduos via incineração ainda no início do século XX, em 1904, mas o período de maior crescimento ocorreu logo depois da Segunda Grande Guerra, mais propriamente durante a crise do petróleo, na década de 1970, quando o país também desenvolveu as suas redes de *District Heating* para as cidades, com o objetivo de reduzir o consumo de petróleo e a poluição. No início, usava-se carvão para aquecer as cidades, mas quando a consciência climática se disseminou, o carvão foi substituído por biomassa e resíduos sólidos urbanos (WILLIAMS, 2011).

Adicionalmente, as leis que restringiram o aterramento de resíduos sólidos urbanos (em 2002, restringiu-se o aterramento de resíduos combustíveis; em 2005, o aterramento de combustíveis orgânicos), fizeram com que os municípios tivessem de achar um caminho para tratar os seus resíduos, e a incineração com recuperação energética foi a principal opção para aproveitar a grande estrutura de *District Heating* (ANDERSSON, 2015).

O crescimento recente do setor contempla tanto o crescimento da capacidade de tratamento quanto a geração de energia, conforme a Figura 14, na qual também pode-se verificar que, enquanto a capacidade de tratamento de resíduos aumentou três vezes no período de 1980-2007, a geração de energia cresceu cinco vezes e as emissões de dioxinas caíram 99% (AVFALLS VERIGE, 2009):

Figura 14 – Desempenho das plantas de recuperação energética suecas

Fonte: Avfall Sverige (2008).

Apesar de nem todos os poluentes caírem tanto quanto as dioxinas, todos diminuíram consideravelmente suas emissões, como se pode ver na Tabela 10, observando também que a redução de chumbo foi de impressionantes 99,80%, e a menor de óxidos de nitrogênio de 38,20%.

Tabela 10 – Redução de poluentes de plantas de *Waste-to-Energy* de 1985 a 2007

	1985	2007	Evolução
Particulados(ton./ano)	420	24	- 94,3%
HCl (ton./ano)	8.400	60	-99,30%
SOx (ton./ano)	3.400	196	-94,20%
NOx (ton./ano)	3.400	2.101	-38,20%
Hg (kg/ ano)	3.300	36	-98,90%
Cd (kg/ ano)	400	6	-98,50%
Pb (kg/ ano)	25.000	51	-99,80%
Energy Output (MWh)	2.800.000	12.151.270	334,00%
Resíduo Processado (ton.)	1.432.100	4.470.690	212,20%

Fonte: Avfall Sverige (2009).

Em números gerais, Fredén (2018) resume que, em 2016, aproximadamente 2,3 milhões (cerca da metade) de toneladas de resíduos se transformaram em energia. No ano anterior, o país prestou serviço (trazendo para o país resíduos, mas também recebendo por eles) outros 2,3 milhões de toneladas de países como Noruega, Reino Unido e Irlanda. E, desde 1985, as emissões de metais pesados das plantas reduziram 99 %, mesmo que a incineração tenha aumentado três vezes desde aquele ano. Williams (2011) analisa os fatores-chave do sucesso do caso sueco, entre eles:

- a) **altos preços dos aterramentos:** em 2005, enquanto na Suécia as tarifas de aterro (*gate fees*) variavam entre €135,00 to \$175,00/toneladas, países como os EUA cobravam US\$ 44,00;
- b) **políticas de apoio à recuperação energética de resíduos:** entre elas, os impostos de carbono, impostos de aterramento, reconhecimento de Waste-to-Energy como uma fonte renovável, quota de renováveis, escala de preferência a partir da hierarquia de resíduos, subsídios e isenção de impostos;
- c) **grande infraestrutura de *District Heating*:** para aproveitar o calor gerado pelas plantas de cogeração;

- d) **falta de fontes de energias baratas no país:** ao longo da história, a Suécia vem buscando uma fonte energética confiável e barata;
- e) **altos preços de eletricidade:** na Suécia, os preços (em 2010) eram cerca de €0,20/kWh (incluindo €0,04 taxes) contra aproximadamente US\$ 0,10/kWh nos EUA;
- f) **alta produção de resíduos:** de modo similar ao resto do mundo, a Suécia tem uma produção crescente de resíduos. Embora o país venha reciclando quase metade dos seus resíduos, a quantidade produzida de resíduos aumentou cerca de três vezes desde os anos 1960, principalmente em função do crescimento econômico;
- g) **apoio público:** não obstante a maioria dos suecos prefira a reciclagem, normalmente apoiam a recuperação de energia dos resíduos, principalmente em função da questão climática (87% dos cidadãos suecos apoiam iniciativas mitigadoras das mudanças climáticas) e redução da poluição (que, neste caso, reduziram mais de 90% desde os anos 1980);
- h) **altas taxas de reciclagem:** comunidades com altas taxas de reciclagem tendem a ter maior recuperação energética de resíduos: quanto mais separados os resíduos, melhor o desempenho da planta, já que vidros e metais são prejudiciais à queima;
- i) **recursos naturais e territoriais limitados:** a terra disponível é crucial para tomadas de decisão referente aos resíduos – a terra na Suécia é relativamente cara.

Por outro lado, a Associação de Gerenciamento de Resíduos da Suécia – *Avfall Sverige* (2008) ressalta a importância das prefeituras e das autoridades locais. Essas instituições, junto com empresas privadas, não apenas criaram condições e garantiram um ambiente adequado para permitir que investidores e tomadores de risco pudessem investir, mas também as próprias prefeituras investiram diretamente na infraestrutura. Novas plantas demandam investimentos consideráveis e a recuperação desses investimentos requer uma fonte de receitas de baixo risco. Nesse sentido, o sistema de *District Heating* é essencial.

Além da ação dos municípios, a Associação aponta as medidas regulatórias e uma série de sistemas de controle – financeiro e de informação – como essenciais na redução de aterramento. Entre as medidas a Associação destaca: o Código Ambiental, em vigor desde 1999; a Nova Diretiva Europeia, em vigor também em 1999; os impostos sobre aterramento (250 SEK por toneladas), implantados no ano 2000; a diretiva sobre aterramento, de 2001; a proibição de aterramento de resíduos combustíveis separados, introduzida em 2002; o aumento do imposto sobre aterramento (370 SEK por toneladas em 2003); a proibição de aterramento de matéria orgânica a partir de 2005; aumento da taxa de aterramento para 435 SEK por toneladas em 2006; o quadro diretivo de 2008.

Ainda de acordo com a Avfall Sverige (2009), os resíduos urbanos que abastecem as plantas de incineração variam de acordo com o contrato entre a empresa e a prefeitura. Os resíduos, entretanto, precisam ser pré-separados, de modo garantir a manutenção de suas propriedades combustíveis. Limites com relação a materiais impróprios para a incineração de resíduos perigosos, baterias, lâmpadas, entre outros são exigidos, por exemplo. Metais também devem ser separados não apenas em função de seu alto valor na cadeia de reciclagem, mas porque prejudicam o processo de incineração, desgastando os equipamentos e causando falhas e interrupções.

Além disso, uma boa separação pode ser importante para a redução das emissões das plantas de recuperação energética de resíduos, já que atualmente um terço dos resíduos queimados são de origem fóssil. A separação de plástico para reuso ou reciclagem é, portanto, uma forma de redução das emissões de CO₂; outra forma, é a produção de plásticos a partir de fontes renováveis. Atualmente, cerca de 3% das emissões suecas de gases efeito estufa vem das plantas de recuperação energética (RENOVA, 2017),

Em 2015, já havia 34 plantas de incineração no país, todas recuperavam energia (não existe incineração sem recuperação energética). Quase todas são plantas de cogeração que produzem tanto calor quanto eletricidade. A produção elétrica é menor do que nas plantas de cogeração que usam madeira, mas os resíduos precisam ser tratados todo o ano. Portanto, as plantas operam por muitas horas e são tipicamente usadas na base. Durante o verão, essa energia é usada para a geração de calor na produção de água quente e resfriamento, usando sistemas de refrigeração por absorção. Muitas plantas são localizadas em grandes cidades para possibilitar a produção de energia durante todo o ano (ANDERSSON, 2015).

Muito embora as medições gravimétricas indiquem que cerca de 58% dos resíduos suecos são de origem renovável (biogênica), de acordo com as regras europeias, apenas metade da energia gerada por resíduos podem ser consideradas de origem renovável, já que os resíduos possuem materiais de origem fóssil, como plástico, e borracha e fibras sintéticas, tintas, químicos etc. (ANDERSSON, 2015).

3.5 DIGESTÃO ANAERÓBICA NA SUÉCIA

A geografia da Suécia é caracterizada por um formato longo e relativamente estreito, com a maior parte da população espalhada na metade sul do país. Por essa razão, as práticas de agricultura e matérias-primas disponíveis variam bastante entre as regiões. Apenas 6.5% da sua área total é usada para agricultura e a área total coberta por florestas é 63% (48% de florestas produtivas), tornando os combustíveis à base de madeira a maior matéria-prima de combustíveis renováveis.

Embora a maior parte das iniciativas para a recuperação de biogás a partir de matérias-primas de fontes agrícolas (embora a produção agrícola específica para gerar biogás seja raramente usada), resíduos sólidos urbanos e resíduos de processos industriais ocorra na parte sul e central, com maior densidade populacional e também de agricultura, uma das maiores plantas de biogás e biometano pode ser encontrada na região de Domsjö, Örnsköldsvik, onde a matéria-prima é a água residual da Domsjö Fabrikerna AB, uma grande empresa de papel e celulose. (CROSS BORDER BIOENERGY PROJECT, 2012)

Apesar disso, o lodo do tratamento de esgotos é atualmente a maior fonte de biogás na Suécia. Desde os anos 1960, o biogás é gerado nas plantas de tratamento de esgotos. Inicialmente, o objetivo era somente reduzir os resíduos (lodo) da estação de tratamento. A partir dos anos 1970, em função da crise do petróleo, a Suécia começou a investir fortemente na recuperação energética dessa matéria orgânica. Além de reduzir o impacto ambiental, o principal objetivo consistia em reduzir a dependência do petróleo. Esse avanço preparou o caminho para que outros setores econômicos desenvolvessem tecnologias para os seus próprios tipos de resíduos. Com isso, os setores de açúcar, papel e celulose, alimentos e resíduos sólidos começaram a produzir biogás como um recurso energético (ENERGIGAS, 2011)

Em 2012, os quatro tipos mais comuns de plantas de biogás eram baseados em estações de tratamento de esgotos (44%), plantas de codigestão (25%), plantas em fazendas (1%) e plantas em indústrias (8%). Adicionalmente, havia um grande número de aterros (22%) com sistemas de coleta e extração de biogás (JONERHOLM, 2012).

Em 2014, quanto ao volume de produção, as 139 estações de tratamento de esgotos produziam 679 GWh/ano; as 35 plantas de digestão anaeróbica que tratam resíduos sólidos produziam 717GWh/ano; cinco digestores anaeróbicos do segmento industrial produzem 127 GWh/ano; e outras 97 plantas agrícolas de digestão anaeróbica produzem 236 GWh/ano. Reunidas, existem 276 plantas produzindo 1784 GWh/ano (SVENSSON 2015). A Tabela 11 abaixo apresenta a distribuição por substrato:

Tabela 11 – Distribuição de plantas de biogás por substrato

Substrato/Tipo de planta	Número de planta	Produção (GWh/ano)
Lodo de esgoto	139	679
Resíduos sólidos	35	717
Agricultura	37	44
Indústria	5	123
Aterros	60	219
Gaseificação	1	1
Soma	277	1 784

Fonte: Svensson (2015).

Mais da metade desse biogás é usado para abastecer veículos suecos. Em 2014, existiam 46.975 carros, 2.315 ônibus e mais 755 caminhões movidos a biometano. O segundo uso mais frequente do biometano é para aquecimento. (24% ou 434 GWh). Cerca de 11% (ou 191 GWh) é somente queimado, cerca de 4% (ou 75 GWh) é usado em processos industriais e 3% (ou 58 GWh) é usado para gerar energia elétrica (SVENSSON, 2015). Isso resulta do fato de que o principal sistema de apoio na Suécia é principalmente focado no aumento do biometano como combustível veicular. O sistema de apoio inclui:

- a) isenção de imposto sobre dióxido de carbono ou de imposto de energia sobre o biogás até o fim de 2020;
- b) 40% de redução de imposto de renda para companhias de gás natural veicular até o fim de 2019 (teto de 10.000 SEK);
- c) subsídios de cidades com orçamento total de € 200 milhões até o fim de 2018; certificado de eletricidade renovável na qual o produtor obtém um certificado para cada MWh de eletricidade de consumidores, sendo que os consumidores devem comprar certificados com relação ao uso total;
- d) subsídio de € 0,4 por biogás a partir de esterco, com orçamento de 355 milhões SEK no período de 2014-2023. Durante o período 2010-2016, havia também subsídios para marketing de novas tecnologias e soluções ligadas ao biogás (SVENSSON, 2016).

Além disso, o gás natural é isento do imposto de energia, o que faz com que, de um lado, fique mais difícil para o biogás competir com o gás natural e, de outro, há de certo modo um subsídio do gás natural ao biogás, uma vez que a regulação exige que a mistura de gás veicular deva ser prioritariamente composta de biogás.

Outro esforço compartilhado diz respeito à infraestrutura de distribuição de gás. No país, há duas redes de gás natural: uma que liga a província de Västra Götalands (província de Gotemburgo) e a Escânia (província de Malmö e Helsingborg). O volume de gás distribuído nessa rede de gás natural é muito baixo. Portanto, o principal uso do biogás comprimido é no transporte (CROSS BORDER..., 2012). Essa rede tem pouco mais de 600 km e a outra é uma pequena rede de 60 km em Estocolmo (SWEDEGAS, 2018; JONERHOLM, 2012).

Para ser usado em transporte ou distribuído na rede de transporte, o biogás precisa ser purificado e alcançar alguns requisitos. Na Europa, esses requisitos são bastante rigorosos, como fica claro na Tabela 12 a seguir, em que são comparados:

Tabela 12 – Requisitos de biometano em países europeus

Composto	Unidade	França		Alemanha		Suécia	Suíça		Áustria	Holanda
		L gás	H gás	L Gas grid	H Gas grid		Lim. Injetado	Unlim. Injetado.		
<i>Higher Wobbe index</i>	MJ/Nm ³	42.48–46.8	48.24–56.52	37.8–46.8	46.1–56.5				47.7–56.5	43.46–44.41
Conteúdo de metano	Vol.-%					95–99	> 50	> 96		> 80
Dióxido de carbono	Vol.-%	<2		<6			<6		≤ 2	
Oxigênio	Vol.-%			<3			<0.5		≤0.5	
	ppmV	<100								
	Mol%									<0.5
Hidrogênio	Vol.-%	<6		≤5			<5		≤4	<12
CO ₂ +O ₂ +N ₂	Vol.-%					<5				
Ponto de orvalho	°C	<-5		<temperatura ambiente		< temperatura ambiente -5			<-8	-10
Umidade relativa	ρ						<60%			
Enxofre	mg/Nm ³	<100 máx., <75 média		<30		<23	<30		≤5	<45

Fonte: Petersson; Wellinger (2009).

Para alcançar esses requisitos mínimos, o país desenvolveu uma robusta indústria com 58 plantas de purificação (dados de 2015) e uma capacidade de tratar quase 25,9 milhões de metros cúbicos de biogás. Entre elas, 42 plantas usam método Water Scrubber e tratam 16,7 milhões de m³/mês; 11 plantas usam *Chemical Scrubber* e tratam 7,4 milhões de m³/mês; 5 plantas usam PSA e tratam 1,4 milhões de m³/mês; e apenas uma usa membrana e trata 360 mil m³/mês (IEA, 2015).

3.5.1 Regulação de biogás na Suécia

Não há regulação específica com relação às instalações de biogás na lei ambiental sueca, o que significa que os limites de odor, ruídos e emissões dessas plantas são os mesmos de outras plantas industriais. Limites de emissões e outras regulações diferem de acordo com o tamanho da planta e a matéria-prima usada. A autoridade ambiental central orienta as autoridades locais sobre como estabelecer limites de emissões (CROSS BORDER..., 2012).

Há algumas regulações específicas com relação ao manejo de matéria-prima e tratamento do lodo. Por exemplo, no caso da planta de tratamento de esgoto, o lodo não pode ser misturado com outros substratos de forma ilimitada. Biofertilizantes, a partir de esterco ou outros subprodutos originários de fazendas de outros proprietários, precisam ser tratados de acordo com a regra para biofertilizantes SPCR 120 (Regra de Certificação Sueca para Biofertilizantes), mas se o lodo é usado como biofertilizante na própria propriedade e não em áreas de produção de alimentos, a regulação é mais branda (CROSS BORDER..., 2012).

Biofertilizantes precisam ter a origem apropriada. Em Borås, uma nova planta de biogás não pôde vender os seus lodos como biofertilizantes em função de a estação de tratamento de esgotos, que também envia o seu lodo para os biodigestores, tratar chorume de um antigo aterro, com o objetivo de minimizar os custos (ELIASSON, 2017).

No que tange propriamente ao biogás, seu uso principal como combustível exige sua purificação e transformação em biometano. Tanto para o transporte como para a rede de distribuição, é preciso aumentar o poder calorífico do gás (reduzindo a proporção de substâncias não combustíveis) e preencher os requisitos dos equipamentos (reduzindo substâncias que podem danificá-los).

Embora seja tecnicamente possível rodar veículos com biogás sem a remoção do dióxido de carbono, se o motor for especialmente ajustado para isso, algumas razões tornam a purificação do gás na origem mais vantajosa: aumenta o poder calorífico do gás, reduzindo necessidade e custos de armazenamento e transporte; cria uma qualidade consistente de biogás de diferentes plantas; leva à qualidade similar do gás natural, evitando a necessidade de ajuste dos veículos, entre outros (PERSSON; JÖNSSON; WELLINGER, 2006).

Os fabricantes de veículos exigiram parâmetros de qualidade para desenvolver sistemas de motores e combustíveis compatíveis. Em 1999, a Suécia desenvolveu o seu padrão nacional para biogás para uso automotivo, cujos principais parâmetros estão na Tabela 13:

Tabela 13 – Parâmetros do Biogás para uso veicular na Suécia

Parâmetro	Unidade	Padrão
<i>Lower Wobbe Index</i>	MJ/nm ³	43,9 – 47,31
MON (número de octanas no motor)	-	>130 (calculado de acordo com a ISO 15403)
Ponto de orvalho	°C	<2-5
CO ₂ +O ₂ +N ₂	vol.-%	<5
O ₂	vol.-%	<1
Total de enxofre	mg/ nm ³	<23
NH ₃	mg/ nm ³	20

Fonte Persson; Jönsson; Wellinger (2006).

Tomas Johansson (2017) ressalta que a quantidade atual do limite de CO₂, N₂ e O₂ presente no biometano evoluiu de 5% para 4%.

3.5.2 Biometano de Resíduos

Nos anos recentes, entretanto, um número cada vez maior de plantas tem sido construído para fermentar outros materiais residuais, como restos de alimentos, resíduos municipais separados, restos de indústrias de alimentos e de restaurantes e esterco (ANDERSSON, 2015).

Cada habitante sueco produz aproximadamente 82kg de resíduos alimentares, enquanto restaurantes e bufês produzem 22kg por pessoa/ano e 7kg por pessoa/ano é produzido no varejo. No total, 1.072.000 toneladas de resíduos são produzidas por essas categorias (AVFALL SVERIGE, 2015).

Em 2016, a Suécia tratou 757.480 toneladas de resíduos sólidos (ou 76 kg por pessoa) por meio de tratamento biológico, o que significa 12,52% do total de resíduos sólidos tratados (AVFALL SVERIGE, 2017). O tratamento biológico dos resíduos alimentares possui duas rotas principais: a digestão anaeróbica (com geração de gás) e a compostagem. Na Suécia, essas rotas têm diferentes tendências: enquanto a compostagem (que não gera combustível energético) caiu 16%, a digestão anaeróbica cresceu 21%, (AVFALL SVERIGE, 2015).

Para que isso fosse possível, a separação de resíduos alimentares teve um crescimento significativo ao longo dos anos recentes. De 30 mil toneladas em 2005, os resíduos alimentares coletados separadamente saltaram para 337 mil toneladas em 2014. Esse aumento na matéria-prima disponível possibilitou que a indústria de biogás aumentasse quase 30% de sua produção, passando de 1.300GWh anuais para cerca de 1.900GWh no mesmo período (ENERGIMYNDIGHETEN, 2016). O período de crescimento coincide com o período de esforço na separação de resíduos alimentares como pode ser conferido na figura abaixo:

Figura 15 – Produção de biogás na Suécia
Fonte: Adaptado de Energimyndigheten (2016).

Esse crescimento no tratamento por meio de digestão anaeróbica permitiu um grande uso do biogás no setor de transporte. A energia produzida via digestão anaeróbica cresceu de 264.660 MWh, em 2010, para 591.960 MWh, em 2014, mais do que o dobro. A maioria dos ônibus das maiores cidades rodam usando biometano produzido a partir de resíduos alimentares, resíduos industriais e esgotos.

A produção de lodo, outro subproduto da digestão anaeróbica, também saltou de 582.750 para 1.236.560 toneladas no mesmo período. Esse lodo pode ser usado como biofertilizante no lugar de fertilizantes fósseis na agricultura e reduz a necessidade de fertilizantes minerais importados, como o fósforo, um recurso finito. Plantas que produzem biofertilizantes de resíduos orgânicos separados na origem recebem certificação da Avfall Sverige para serem comercializados (AVFALL SVERIGE, 2015).

3.5.3 Biometano no Transporte na Suécia

Mesmo tendo alta proporção de renováveis em sua matriz (53 % em 2014), a Suécia precisa avançar em alguns setores. O transporte é um deles, visto que representa cerca de 23% da energia final e apenas 15% é baseado em combustíveis renováveis. O setor representa cerca de um terço das emissões globais do país, sendo o maior setor em emissões, acima da indústria, calor, eletricidade e agricultura. Por essa razão, o atual esforço sueco se concentra na promoção de um transporte de baixo carbono, viabilizando, por exemplo, o biogás e o biometano, que hoje representam cerca de 10% do total uso de biocombustíveis do país (LÖNNQVIST, 2017)

Tal esforço surtiu efeito. A Suécia é líder mundial tanto em termos de uso automotivo de biometano quanto no transporte fora da rede do biometano. Em 2014, mais de 50% do biogás produzido era usado como combustível para transporte, representando mais do que 70% do total de Gás Comprimido Veicular (fração bem maior do que os 30% restantes de gás natural) vendido no país. Na Suécia, gás natural e biometano são combustíveis complementares (BACKMAN; ROGULSKA, 2016).

O uso de transporte gasoso na Suécia é antigo. Durante a Segunda Grande Guerra, diversos países buscaram fontes alternativas de energia para enfrentar a falta de petróleo. Na Suécia, a escassez reduziu o abastecimento de óleo de 11 milhões de barris, em 1939, para 800 mil barris, em 1942. A alternativa encontrada para abastecer veículos foi o uso de combustíveis gasosos, compostos basicamente de monóxido de carbono e hidrogênio, obtidos a partir da gaseificação de combustíveis sólidos como carvão e madeira.

Na Figura 16, há três exemplos de trailers gaseificadores usados nos ônibus urbanos na cidade de Estocolmo, na década de 1940. Da esquerda para a direita: gerador de gás a partir de carvão vegetal, gerador a partir de madeira e biogás comprimido em cilindros de 150 bar. Aproximadamente 90% dos veículos suecos e 100% dos tratores foram convertidos para sistemas de combustíveis gaseificados (CARDOSO, 2014):

Figura 16 – Trailers gaseificadores usados nos ônibus urbanos da cidade de Estocolmo, na década de 1940

Fonte: Lampinen (2013).

Mesmo depois da guerra, a Suécia permaneceu focada na gaseificação de veículos, em função dos seus vastos recursos madeireiros. Depois da crise de Suez, o governo intensificou seus esforços para estabelecer um plano estratégico de emergência energética e decidiu incluir o combustível gasoso (CARDOSO, 2014).

Todavia, entre 2000 e 2014, o mercado sueco de combustível gasoso disparou (como se pode observar na Figura 17). Se, em 2000, a frota sueca que rodava com biometano era menos de 2500, no final de 2014, a tinha uma frota de 46.975 veículos leves, 2.315 ônibus (17 % do mercado nacional) 750 caminhões pesados (BACKMAN; ROGULSKA, 2016).

Vehicle gas (fordonsgas) development in Sweden

Figura 17 – Desenvolvimento de biogás na Suécia

Fonte: Johanson (2017).

Para atender essa demanda, foi criada uma grande infraestrutura. Em 2014, havia 59 plantas de purificação de biogás em operação (41 *Water Scrubbers*, 6 PSA e 12 *Amina Scrubbers* – em 2015 duas novas unidades de membrana e uma unidade criogênica entrariam em operação). Muito embora o país tivesse limitado acesso à rede de gás canalizado (300 km esticados ao longo da costa sudoeste), o país conseguiu construir uma rede de abastecimento na metade sul do país, que está expandindo para a parte norte.

No final de 2014, existiam 155 estações públicas de abastecimento e 63 privadas. Em mais de uma dúzia de cidades, as frotas de ônibus urbanos são completamente abastecidas por biometano (BACKMAN; ROGULSKA, 2016).

Obviamente, havia um sistema de apoio ao uso de biometano, especialmente focado no uso como combustíveis veiculares: alíquota zero de impostos de carbono; 40% de redução de imposto de renda para empresas de gás veicular por um período; subsídios para o marketing de novas tecnologias; soluções para biogás (máximo de 45% ou 25 MSEK dos custos de investimento); subsídios para investimentos climáticos para prefeituras, orçamento total de 1.925 MSEK, 0,2 SEK/kWh para soluções de biogás a partir de esterco, com o propósito de reduzir as emissões de esterco, orçamento total de 355 MSEK em dez anos (BACKMAN; ROGULSKA, 2016).

Além do mais, se a Suécia publicou a sua visão de ter o seu sistema de transporte público livre de combustíveis fósseis até 2030, e um sistema de energia sem emissões líquidas de gases efeito estufa até 2050, a indústria de gás, alinhada com o governo, também anunciou sua visão de 100 % de biometano no mercado de gás veicular em 2030, e 100 % de biometano na rede de gás canalizado em 2050 (BACKMAN; ROGULSKA, 2016).

Em outra frente, para atender a visão do governo central, os municípios trabalham políticas locais para fomentar o mercado local de biogás. Uma vez que as prefeituras controlam tanto as fontes de biogás como resíduos orgânicos e grande parte do setor de transporte, eles têm um papel chave para a transição de um setor de transporte 100 % baseado em energia renovável; são responsáveis pela gestão dos resíduos sólidos urbanos e também decidem os combustíveis a ser usados em suas frotas, no transporte público e nos caminhões de lixo. Isso significa que as prefeituras podem criar os seus mercados locais, diretamente, com colaboração de empresas privadas ou criando suas próprias companhias, como as empresas Svensk Biogás e Fordonsgas (BACKMAN; ROGULSKA, 2016).

Visando ganhar escala e sinergia, algumas instituições foram criadas para coordenar os esforços das prefeituras. Na província da Escânia, por exemplo, foi criada a Biogás Syd, organização focada em aumentar o consumo e a produção de biogás no sul da Suécia, que articula diferentes setores do Mercado de biogás e é patrocinada pelas principais empresas de gestão de resíduos e companhias de energia da província; além de reunir prefeituras, empresas de transporte e institutos de pesquisas (GRAHN, 2017).

Além dos esforços municipais, outro vetor do sucesso alcançado na Suécia é a capacidade tecnológica das empresas locais focadas na produção de biogás e biometano, como as empresas de purificação de biogás, Malmberg e Purac, e no desenvolvimento de veículos de gás, Scania e Volvo. A interação entre essas empresas, institutos de pesquisa, decisões políticas, comércio e indústria tem sido determinante para o desenvolvimento do biogás. E é sintomático nas regiões que mais desenvolveram o mercado, como as regiões de Västra Götaland (a que pertence a cidade de Gotemburgo) e Escânia (da qual fazem parte os municípios de Malmö e Helsingborg) (BACKMAN; ROGULSKA, 2016).

A região de Västra Götaland é líder na produção de biometano para uso veicular, pois lá se localiza cerca de um terço das estações de abastecimento de biometano. No final de 2009, havia cerca de 7.500 veículos rodando a gás automotivo, consumindo 100 GWh de biogás e 100 GWh de gás natural. A região tem uma longa história no uso de metano em seus veículos. Em 1922, a principal empresa de tratamento de esgotos de Gotemburgo começou a produzir biometano, ao lado da mais importante estação de tratamento de esgotos da cidade.

A Volvo construiu o seu primeiro ônibus movido a metano no fim dos anos 1980. Em 1994, a primeira estação de abastecimento de gás comprimido foi construída na principal estação de tratamento da cidade de Gotemburgo, Gryaab. Desde 1996, os ônibus urbanos da cidade de Trollhattan, ao norte de Gotemburgo, passaram a ser abastecidos por biogás produzido localmente. Em 1998, foi fundada a empresa Fordonsgas (BACKMAN; ROGULSKA, 2016).

Em 2001, o projeto Biogás West foi lançado para implementar o biogás como combustível veicular. O projeto envolve mais de 25 parceiros, representando companhias, organizações, autoridades e prefeituras na região oeste do país. Como resultado do esforço, o biogás é usado em larga escala e substitui 20% do combustível fóssil do setor de transporte da região, considerando carros, ônibus, caminhões e barcos. Para ajudar, a região é uma das únicas do país a ter uma rede de distribuição de gás natural (BACKMAN; ROGULSKA, 2016).

Por outro lado, mais ao sul, a Província da Escânia também desenvolveu um importante mercado de biometano. O objetivo da província é alcançar 3TWh de produção de biogás em 2020, dos quais 95 % será originário de matéria-prima residual e 85 % voltado para veículos. Em 1987, a cidade de Malmö foi a primeira a utilizar gás natural comprimido em seus ônibus. Em 2000, todos os ônibus já rodavam com esse combustível. Em 1996, outros tipos de veículos começaram a usar gás comprimido (CNG), quando a primeira estação de abastecimento foi aberta. O uso de biometano começou em 2008, quando uma planta de purificação foi aberta na estação de tratamento de esgotos na cidade. Desde então, a fração de biometano vem crescendo (BACKMAN; ROGULSKA, 2016).

Apesar de não estar próxima de alcançar a meta, a região da Escânia desenvolveu bastante o mercado de biometano, não apenas com a instalação de diversas plantas de purificação, como mostra a Figura 18, mas também com a instalação de diversas estações de abastecimento (Figura 19) e a maior parte do transporte público rodando com biometano:

Figura 18 – Plantas Biogás na Escânia

Fonte: Grahn (2017).

Figura 19 – Estações de abastecimento na Escânia

Fonte: Grahn (2017).

Em 2015, a região alcançou a meta de ter todos os ônibus rodando com combustíveis não fósseis, como biometano, biodiesel ou eletricidade renovável. Para 2018, a meta é ter todo tráfego regional (incluindo trens) rodando sem combustíveis fósseis. Em 2016, a taxa era 82% (GRAHN, 2017).

Apesar de todo esse desenvolvimento, o mercado de biometano veicular passa por certa inflexão, não tendo avançado como anteriormente, o que tem chamado a atenção de pesquisadores. Lönnqvist (2017) analisa os gargalos por que passa o mercado e coloca em números que o potencial de produção de biogás pode atender facilmente à demanda projetada por diversos estudos, que variam de 1800 GWh, em 2020, até 2770 GWh, em 2030, sendo que os potenciais teóricos e práticos podem ser acompanhados na Tabela 14:

Tabela 14 – Potenciais teórico e práticos de produção de biogás na Suécia e na Província de Estocolmo

	Suécia		Estocolmo	
Categoria de recurso	Teórico (GWh)	Prático (GWh)	Teórico (GWh)	Prático (GWh)
Resíduos alimentares	1.300	680	285	115
Lodo de Esgotos	1.000	890	289	164
Resíduos industriais	2.000	1.000	67	24
Resíduos agrícolas úmidos	4.200	2.220	134	133
Resíduos agrícolas secos	8.100	980	151	2
Colheita em terra de pousio	2.840	1.420	224	112
Total	19.440	7.190	1.150	550
Colheita em terras aráveis	66.800	1.670	2.145	54

Fonte: Lönnqvist (2017).

Por essa razão, o autor considera que o principal gargalo se dá na demanda, em especial no mercado de veículos particulares, em função da percepção, entre outras coisas, de incerteza desse mercado diante da expansão dos veículos elétricos e consequente impacto na cadeia de veículos a gás, por exemplo, na capacidade de revenda destes. Tal aspecto, entretanto, não contempla os veículos grandes, ônibus e caminhões, pois a percepção de adequação do combustível ao veículo já é consolidada.

3.6 ECONOMIA CIRCULAR E QUESTÕES SOBRE O FUTURO

Os países mais avançados em gestão de resíduos já saíram da primeira fase de simplesmente evitar o aterramento e agora se dedicam a aumentar a fração da destinação dos níveis mais altos da hierarquia de resíduos. Por isso, buscam aumentar o reuso e a reciclagem, criando uma circularidade da matéria, alterando o paradigma produtivo, portanto concebendo um novo conceito econômico: a economia circular.

A economia tradicional foca no aumento da produção e do consumo e desconsidera os recursos usados e a destinação final dos materiais residuais dos processos de produção e consumo. A partir desse paradigma, empresas e países estabelecem suas estratégias para otimizar a sua produção e fomentar o consumo dos seus produtos. Tal modelo funciona em um mundo sem restrições de espaço e recursos e enquanto o impacto humano no meio ambiente era irrelevante.

Entretanto, desde a década de 1970, economistas e gestores foram percebendo que essa não era mais uma realidade. Autores como Walter Stahel, David W. Pearce e R. Kerry Turner iniciaram a apresentar os problemas da economia tradicional que não prevê o fim dos recursos naturais. O relatório da Fundação Ellen MacArthur “Em Direção à Economia Circular” define o paradigma econômico tradicional como economia ‘pega-faz-joga’, que está levando à escassez, portanto à volatilidade e à subida dos preços (ELLEN MACARTHUR FOUNDATION, 2013).

Para lidar com isso, foi criado o conceito de Economia Circular, onde o valor dos produtos, materiais e recursos é mantido na economia por tanto tempo quanto possível, com isso a geração de resíduos é minimizada. Esse conceito entende que a gestão de resíduos segue a hierarquia de resíduos, cujo primeiro propósito é estabelecer uma ordem de prioridade que minimize efeitos ambientais adversos e otimize a eficiência de recursos.

A produção e o consumo no qual esse conceito é baseado possui duas “voltas”, uma para materiais “biológicos” (que podem ser decompostos por organismos vivos) e outra para materiais técnicos (que não podem ser decompostos por organismos vivos). Em ambos os casos, o objetivo é reduzir ao máximo o desperdício de recursos (EP, 2016).

Em dezembro de 2015, a Comissão Europeia, focada nos objetivos de desenvolvimento sustentável, estabeleceu um Pacote de Economia Circular, o “Fechando o Ciclo – Um plano de ação da União Europeia para a Economia Circular”, que inclui propostas legislativas revisadas sobre resíduos para impulsionar o caminho da Europa rumo à economia circular que, por sua vez, pretende impulsionar a competitividade global, incrementar o crescimento econômico e gerar novos empregos.

Esse pacote estabelece um concreto e ambicioso programa de ação, com medidas cobrindo todo o ciclo: da produção e consumo à gestão de resíduos e ao mercado de materiais secundários, contribuindo para “fechar a volta” do ciclo de vida dos produtos por meio de maior reciclagem e reuso e trazendo benefícios tanto para o meio ambiente quanto para a economia (ÖSTLUND, 2017).

O resumo das características básicas do Pacote de Economia Circular, lançado pelo Parlamento Europeu (EP, 2016), estabelece que “o movimento em direção à economia circular poderia oferecer oportunidades como a redução de pressão sobre o meio ambiente, aumento da segurança no abastecimento de matérias-primas, aumentar a competitividade, inovação, crescimento e empregos”. Mas ressalta que “a mudança também coloca mudanças como o financiamento, viabilizadores-chaves do financiamento, talentos, comportamento dos consumidores e modelos de negócios, e governança em todas as instâncias”.

O Pacote de Economia Circular inclui um Plano de Ação e uma lista de medidas. Entre essas medidas, a emenda das Diretivas sobre Resíduos Waste (2008/98), Resíduos de Embalagem (94/62), Aterros (1999/31), e Resíduos Elétricos e Eletrônicos (2012/19), mas também desenvolveu padrões de qualidade para matérias-primas secundárias, estabeleceu um plano de trabalho de *Ecodesign*, revisou a regulação em fertilizantes e criou uma estratégia sobre plásticos na economia circular.

A iniciativa deu um sinal econômico para operadores de que a União Europeia pretende transformar a economia, abrindo caminho para novas oportunidades de negócios e impulsionando a competitividade. A estratégia é apoiar modos inovadores e mais eficientes de produzir e consumir e, sendo assim, criando empregos enquanto preserva recursos valiosos e cada vez mais escassos (EUROPEAN COMMISSION, 2015). As metas estabelecidas pelo pacote são:

- a) uma meta comum da União Europeia de reciclar 65% de resíduos sólidos urbanos até 2030;

- b) uma meta comum da União Europeia para reciclar 75% de resíduos de embalagens até 2030;
- c) uma meta obrigatória de reduzir aterramento de no máximo 10% dos resíduos municipais em 2030;
- d) proibição de aterramento de resíduos alimentares coletados separadamente. Para alcançar essas metas, o pacote também determina:
 - sistema de monitoramento imediato para cumprimento das metas;
 - requerimentos mínimos para esquemas de responsabilidade dos produtores estendida;
 - medidas promovendo reuso e prevenção (incluindo de restos alimentares);
 - racionalizar as disposições relativas aos subprodutos e ao estado final de resíduos;
- e) definições, métodos de cálculo para metas, obrigações sobre relatórios e disposições sobre atos delegados e implementados (EP, 2016).

As medidas devem ser divididas em: legislativas, comunicados e relatórios; implementação e obrigatoriedade; guias e melhores práticas; indicadores; padrões; apoio; instrumentos financeiros (EP, 2016). Entre os exemplos, podem ser mencionados os incentivos econômicos para desencorajar o aterramento e promover o reuso, estimular a simbiose industrial, fomentar produtos verdes no mercado, apoiar esquemas de recuperação e reciclagem, assim como estabelecer definições simplificadas e melhoradas, métodos de cálculos harmonizados para taxa de reciclagem (EUROPEAN COMMISSION, 2015)

Portanto, o continente está a caminho de um futuro mais sustentável, com modelos de gestão de resíduos, materiais e energia progressivamente melhorados. Até agora, a Suécia é um dos principais modelos a serem seguidos, pois tem 34,6 % de reciclagem; 16,2% de reciclagem biológica (digestão anaeróbica) e somente 0,7% de aterros. O desempenho médio dos 27 países é bem pior, com aproximadamente 25% aterrado, 27% reciclado e 25% incinerado, o resto é compostado ou tem outra destinação (EUROSTAT, 2017)

De todo modo, alguns atores chaves suecos estão desconfortáveis devido ao fato de que metade dos resíduos tem a sua energia recuperada basicamente por incineração. Consequentemente, há uma grande discussão no país sobre a necessidade de expansão das plantas de incineração, ou se a recuperação energética dos resíduos deve se expandir somente por meio do tratamento biológico. Alguns, por outro lado, defendem as usinas como forma de

obtenção de recursos, uma vez que há vários países que precisam evitar aterramento e a Suécia tem grande experiência e capacidade no setor.

3.7 ASPECTOS PRINCIPAIS DO CAPÍTULO 3

Apesar de atualmente ser um país que concilia alto nível de desenvolvimento e estabilidade social, a Suécia alcançou o patamar de sociedade industrializada tardiamente, a partir da Segunda Revolução Industrial. Aproveitando-se do fato de que um dos motores dessa revolução consistiam na eletricidade e em seu alto potencial hidrelétrico, o país desenvolveu uma robusta indústria para esse setor, deixando para trás a situação de pobreza que o caracterizava até o século XIX.

Entretanto, o alto nível de desenvolvimento trouxe novos desafios para o país: apesar de a eletricidade ser abundante, com o desenvolvimento, o país passou a precisar de energia térmica e motriz em grandes quantidades; logo, os combustíveis fósseis importados vieram a suprir essa demanda, mas gerando, além de poluição em níveis críticos nos centros urbanos, grande vulnerabilidade aos choques de oferta.

A partir da metade do século XX, a necessidade de diminuir a poluição das cidades fez com que o país buscasse uma racionalização da geração de calor forma centralizada, os sistemas de *District Heating*. Nessa mesma época, surgiu a necessidade de reduzir os grandes volumes de lodo de tratamento de esgotos, abrindo perspectivas para o desenvolvimento das tecnologias de digestão anaeróbica. Ambas as iniciativas seriam fundamentais para as posteriores rotas de aproveitamento energético de resíduos.

O alto nível de desenvolvimento também gerou, no decorrer do século XX, grande quantidade de resíduos urbanos e industriais. Na década de 1970, quando o petróleo antes barato se tornou um grande fardo para as economias, o país buscou novas fontes de energia térmica e motriz. Os resíduos foram parte dessa busca, ocupando o papel de aquecimento nos sistemas de *district heating* e suscitaram as pesquisas de aproveitamento do biogás dos digestores anaeróbicos.

Grandes desafios tiveram de ser superados, incluindo as desconfianças com relação à confiabilidade das soluções tecnológicas, mas a estabilidade institucional, assim como a visão de longo prazo, vigentes no país, possibilitaram que as tecnologias tivessem uma evolução contínua. Essa visão de futuro ficou evidente com a imediata adesão do país à questão climática, sendo um dos primeiros a instituir uma taxa sobre as emissões de carbono, ainda em 1991, quando a questão era incipiente.

O mesmo foco se deu na busca por alcançar cada vez maiores níveis de redução dos desperdícios materiais e energéticos dos resíduos, proibindo o aterramento e fomentando a economia circular. Desse modo, assim como saltou da condição de pobreza para a de nação desenvolvida, em função de uma revolução tecnológica (Segunda Revolução Industrial), o país atua para não perder a atual revolução tecnológica.

4 VISITAS TÉCNICAS E ANÁLISE DAS SOLUÇÕES ENCONTRADAS

Para verificar o estágio de desenvolvimento da gestão de resíduos e o mercado de recuperação energética na Suécia, foram realizadas diversas visitas técnicas a produtores e instituições produtoras tanto de calor e eletricidade quanto de biometano a partir de resíduos sólidos urbanos. A produção de calor e eletricidade se dá por meio da incineração dos resíduos sólidos urbanos combustíveis e a produção de biometano – usado principalmente para movimentar veículos – se dá por meio da digestão anaeróbica de resíduos sólidos orgânicos.

No período de seis meses (de março a agosto de 2017, o pesquisador esteve debruçado sobre o sistema de gerenciamento de resíduos sueco, utilizando-se da estrutura do Campus de Helsingborg, da Universidade de Lund, sob supervisão do Professor Torleif Bramryd (e orientação da Professora Virgínia Parente).

Foram realizadas várias entrevistas com especialistas, a saber: Anna-Carin Gripwall, da Associação Sueca de Resíduos Sólidos (Avfall Sverige); Desirée Grahn, diretora da Biogas Syd, consórcio para fomento de biogás na Escânia; Ingemar Gunnarsson, da Göteborg Energi; Per Lindgren, da empresa de limpeza de gases GMAB; Bernt Svensén, da Göteborg Business Region; Professor Tobias Richards, da Borås Högskola; Erik Dahlquist, da Mälardalens Högskola; Catarina Östlund, da Agência de Meio Ambiente da Suécia (Naturvardsverket), além de participar da Conferência Opening the Bin, que reuniu pesquisadores da Europa e América do Norte.

Também foram visitadas plantas de incineração em Malmö, Helsingborg, Borås, Kil, Karlskoga, Västerås, Södertälje, Linköping e Jonköping, além de plantas de biometano em Helsingborg, Borås, Karlskoga, Västerås, Huddinge e Kristianstad. Dentre as 12 mais populosas cidades do país, apenas Uppsala, Örebro e Norköping não tiveram nem visitas nem entrevistas cobertas por esse estudo. Norköping foi visitada, mas sem entrevista ou visita técnica.

Além disso, foi visitada a Agência Ambiental Sueca, a Swedish EPA, ou Naturvardsverket, que tem basicamente o seguinte papel na gestão de resíduos do país: produzir diretrizes de regulação; licenciar processos que tratam de atividades de risco ambiental alto – consultas, direito de apelação contra a licença; estabelecer um plano nacional de gestão de resíduos e programas para prevenção de resíduos; apoio governamental nas políticas e legislação tanto nacionalmente quanto na União Europeia; cálculos e estatísticas; emitir licenças para importação e exportação de resíduos (ÖSTLUND, 2017).

Como exemplo de atuação nos cálculos e estatística, podemos acompanhar a evolução significativa das alternativas ao aterramento de resíduos a partir de 1992. Na Figura 20, nota-se que o banimento do aterramento dos resíduos combustíveis contribuiu mais fortemente na minimização do aterramento do que o banimento do aterramento de resíduos orgânicos:

Figura 20 – Tratamento de resíduos urbanos – instrumentos usados

Fonte: Östlund (2017).

A Agência segue os dados para verificar também o estágio de cumprimento da meta, por exemplo, o desempenho dos produtores responsáveis por alcançar as metas de reciclagem previstas na disposição da responsabilidade estendida do produtor. Os números dessas metas podem ser acompanhados na Tabela 15:

Tabela 15 – Metas de reciclagem da responsabilidade estendida dos produtores

	Estatística <i>Eurostat</i> 2012	Meta 2017	Meta 2020
Metal	67 %	70 %	85 %
Papel/cartão	77 %	65 %	85 %
Vidro	88 %	70 %	90 %
Plástico	29 %	30 %	50 %
Madeira	17 %	15 %	15 %
Total		55 %	65 %

Fonte: Östlund (2017).

Quando se trata de apoio à formulação de política, a Agência foi essencial nas principais políticas da gestão de resíduos, entre elas: objetivos ambientais e hierarquia de resíduos; planejamento municipal de resíduos (1991); responsabilidade do produtor; imposto sobre aterramento (2000); imposto sobre incineração de resíduos urbanos (2006-2010); proibição de aterramento (2002, 2005); apoio governamental a investimentos (1998-2008, 2015-); e plano nacional de gestão de resíduos e programa de prevenção de resíduos (ÖSTLUND, 2017).

O plano nacional de gestão de resíduos de então (2012-2017) estabeleceu as seguintes estratégias: encontrar novos instrumentos para atender a hierarquia de resíduos e desenvolver instrumentos para reduzir o consumo de novos recursos e materiais; fabricação de produtos sustentáveis, considerando o potencial de melhoramento dos designs dos produtos para facilitar o reuso, reparo e reciclagem; aumentar a reciclagem de boa qualidade; usar o material armazenado na sociedade, o que inclui mineração urbana e mineração de aterro (ÖSTLUND, 2017).

Há, neste plano, dois exemplos de novas metas que devem orientar as prefeituras e as empresas: ao menos 50% de reciclagem biológica de resíduos alimentares, em 2018; ao menos 70% de reúso e reciclagem de material de construção e restos de demolição, em 2020. Focados nessas metas e leis gerais, os principais atores (prefeituras e empresas) exercem seus papéis.

As prefeituras são responsáveis pela coleta dos resíduos urbanos e o serviço é pago por uma tarifa de resíduos que as empresas precisam pagar. De outro lado, sob o regime de responsabilidade do produtor, alguns tipos de resíduos como as embalagens precisam ser coletadas pelos produtores das mesmas (ÖSTLUND, 2017).

Em 2013, as taxas de reciclagem alcançadas pela logística reversa, estabelecida pelo sistema de responsabilização do produtor (com a colaboração das prefeituras que oferecem uma grande infraestrutura como os 630 centros de reciclagem), foram: vidro: 89%; metais: 73%; papel e papelão: 77%, plástico 37%, e papéis de jornal e revista: 80% (ÖSTLUND, 2017).

De acordo com Östlund (2017), o caso de sucesso da reciclagem na Suécia se deve a uma série de ferramentas de políticas misturadas, dentre elas: compromisso das autoridades locais; cooperação entre os atores principais; consciência dos benefícios sociais da coleta seletiva e da reciclagem dos resíduos na população sueca (há uma pesquisa que mostra que 96% dos habitantes suecos fazem parte do sistema de separação ao menos em uma pequena parte, e 82 % dizem que fazem isso porque querem contribuir para uma sociedade recicladora).

Os municípios são os principais atores desse avanço alcançado e este estudo de caso pôde conhecer 11 municípios e os seus sistemas de recuperação energéticas de resíduos. São soluções e estratégias diferentes de cada município que, neste capítulo, a título de organização, serão divididos por tamanho.

É importante ressaltar que as dimensões populacionais suecas são muito menores do que as brasileiras. A primeira série de municípios reúne as três maiores cidades do país: Estocolmo, Gotemburgo e Malmö; a segunda, os municípios com cerca de 100 mil habitantes, médias para os padrões suecos; e a terceira lista reúne as pequenas cidades: Borås, Kristianstad, Karlskoga e Kil.

4.1 CIDADES MAIORES E SUAS ESTRATÉGIAS NA GESTÃO DE RSU

Estocolmo, Gotemburgo e Malmö não somente são as maiores cidades, como também formam um triângulo que envolve a principal área econômica do país. Acima desse triângulo existe um vasto território (cerca de dois terços do território sueco), mas a única cidade populosa, Uppsala, com cerca de 140 mil habitantes, fica pouco ao norte de Estocolmo. O restante das cidades populosas fica no terço territorial sul que congrega as três maiores cidades.

Estocolmo é a capital do país, sede da monarquia e do parlamento. Fica no extremo leste do país, de onde barcas saem para Helsinki, a capital finlandesa, e outros países do Mar Báltico. Gotemburgo fica do lado oposto, bem próxima da Noruega e sua capital, Oslo. Por sua vez, Malmö é a principal cidade do sul do país, separada pelo canal de Öresund da Dinamarca e ligada pela Ponte de Öresund a Copenhague, a capital dinamarquesa. Entretanto, os grandes municípios suecos têm diferentes desafios e também estratégias ligadas ao gerenciamento de resíduos, recuperação energética de resíduos e *district heating*.

4.1.1 Estocolmo, o desafio da capital do país

Embora a cidade de Estocolmo tenha cerca de 900 mil habitantes, a Grande Área de Estocolmo é bem maior, com quase 50% mais habitantes. A província de Estocolmo, por sua vez, reúne 26 municípios, sendo a província mais densamente populosa, com mais de dois milhões de habitantes, reunindo, portanto, cerca de um quinto da população sueca. O Conselho da Província de Estocolmo tem 149 membros (MOKTAN, 2013).

Apesar de estar sob a lei nacional, as prefeituras são responsáveis diretas pela gestão de resíduos. A prefeitura de Estocolmo segue os padrões estabelecidos não apenas pelo Código Ambiental, pela Lei de Resíduos e pelas regras aos produtores estabelecidos nacionalmente, mas também os padrões estabelecidos pelo Departamento Ambiental da União Europeia (ZABALETA, 2008).

As leis locais e a prefeitura regulam a coleta de resíduos, taxas de coleta e disposição. Proprietários de cada propriedade têm de pagar a taxa responsável pelo financiamento da gestão de resíduos na cidade. Com essa taxa, a população cobre os custos de todo o processo de coleta e disposição de resíduos e os impostos. Os impostos incorriam sobre a quantidade enviada para incineração (o imposto sobre incineração foi retirado em 2010) e sobre a quantidade de escória e cinzas aterradas, resultantes da incineração.

Os impostos sobre a incineração foram usados para aumentar a produção de eletricidade das plantas, uma vez que ela variava de acordo com a produção de eletricidade, quanto maior fosse ela (e não somente calor), menor seria o imposto, e quanto menor fosse a produção de eletricidade (só calor), maior era o imposto. O valor dos impostos era calculado diariamente e declarados para a Administração Financeira Nacional mensalmente (ZABALETA, 2008).

Na Suécia, parte da coleta separada de resíduos (a de resíduos orgânicos) é responsabilidade dos municípios, e parte é responsabilidade do produtor: jornais, revistas, embalagens de plástico, de papel e metal, “vidros brancos e verdes e resíduos elétricos e eletrônicos”. Não obstante, a coleta de resíduos orgânicos separadamente em Estocolmo é limitada e, até 2014, só cobria 12% para residências e 36% para negócios (MUNICIPAL WASTE EUROPE, 2014).

Proprietários locadores ou associação de moradores organizam, nas propriedades ou adjacências, coletas separadas de embalagens de vidro, plástico, papel, metal e jornais (resíduos sob responsabilidade do produtor), assinando contrato com uma empresa de gestão de resíduos que, por sua vez, assina contratos com as organizações industriais, como a *Packaging and Newspaper Collection* (FTI), *Pressreturs* ou *Swedish Glass Recycling*, sendo que os resíduos são cuidados por empresas contratadas (MUNICIPAL WASTE EUROPE ON, 2014).

Esses resíduos sob responsabilidade dos produtores também podem ser recebidos em pontos de coleta. Resíduos alimentares de negócios podem ser coletados por caminhão a vácuo ou caminhão de lixo tradicional. Já nas residências, os resíduos orgânicos podem ser coletados via lixeira separada, sistemas de vácuo ou containers subterrâneos (MUNICIPAL WASTE EUROPE, 2014). No entanto, a separação de resíduos alimentares em Estocolmo tem evoluído em ritmo lento.

Por outro lado, a cidade tem uma longa tradição na recuperação energética de resíduos por incineração. Em 1900, houve a primeira decisão de incinerar os resíduos na cidade. Nove anos depois, a primeira planta de incineração começou a funcionar. O resultado foi a diferente evolução das formas de recuperação energética, tendência que só muito recentemente começou a virar. Em 2007, por exemplo, quase 100% dos resíduos urbanos fora do Sistema de responsabilidade do produtor era incinerado. Em 2007, só cerca 1-2% dos resíduos orgânicos da cidade eram tratados biologicamente para a produção de biogás (ZABALETA, 2008).

Desde 1970, por exemplo, a planta de Högdalen produz eletricidade, mas só quando a rede de aquecimento distrital cresceu na cidade é que a planta se transformou numa planta de cogeração (CHP, sigla de: *Combined Heat and Power*) que produz tanto eletricidade como calor. Em 1979, o calor do vapor gerado por duas caldeiras de resíduos era reforçado por uma caldeira movida a petróleo. Duas outras caldeiras a óleo foram construídas naquele ano. Para estabilizar o sistema, também foi construído um acumulador e, enfim, ligado à rede de aquecimento distrital (FORTUM, 2017).

Durante os anos 1980, a capacidade da planta continuou a crescer e uma nova caldeira elétrica foi instalada. Em 1986, uma terceira caldeira movida a resíduos industriais foi instalada. A partir daí a capacidade adicionalmente implantada foi baseada apenas na capacidade energética dos resíduos. Em 1999, a caldeira 6 foi construída para tratar resíduos industriais; em 2005, a caldeira 4, para resíduos residenciais foi inaugurada.

Ao longo do tempo, as caldeiras movidas a óleo foram sendo fechadas ou substituídas por combustíveis residuais. Na planta, há dois geradores: o inicial (G1), instalado em 1969, com 27 MW de potência; e o G6, instalado com o grande upgrade de 1990, com potência de 44 MW (EUROPEAN INTERNATIONAL GROUP, 2013; 2012).

Na Europa, os investimentos e novos desenvolvimentos tornaram a planta de Högdalen uma das mais modernas de *Waste-to-Energy*, incinerando 700 mil toneladas de resíduos ao ano, abastecendo 100 mil residências com calor e 200 mil residências com eletricidade. Desde que ligada à rede de aquecimento, a planta produzia calor apenas para a região centro-sul da cidade. Contudo, em 2007, a região foi conectada à região central da cidade, e posteriormente conectada à região mais ao sul, antes abastecida pela Söderenergi.

A tendência de incineração de resíduos na capital sueca está distante de acabar, novas plantas como a Brista, situada a noroeste da cidade, que, desde 1997, funcionava a partir da madeira para aquecer a região, passou, a partir de 2013, a também se utilizar de resíduos sólidos, assegurando que se prepara para o crescimento populacional tanto no que diz respeito ao crescimento do volume de resíduos sólidos como de geração de energia elétrica e calor.

Se a planta Brista 1, movida a chips de madeira, produz 763 GWh de calor e 293 GWh de eletricidade anuais a partir de 350 mil toneladas de chips de madeira, a planta Brista 2 usa 240 mil toneladas de resíduos sólidos urbanos para produzir 490 GWh de calor e 120 GWh de eletricidade anualmente (FORTUM, 2017).

Além das plantas da Fortum, o sistema de aquecimento distrital é conectado com outros municípios da Grande Área de Estocolmo, como Södertälje. Em 2016, esse município a companhia Söderenergi, que tem três plantas, entregou 2.450 GWh de calor e 213 GWh de eletricidade (ano em que tiveram problema numa turbina). Inicialmente, a empresa foi criada para prover calor para municípios como Södertälje, Botkyrka, Salem e Huddinge, mas a sua rede foi conectada e hoje faz parte de um sistema complexo que congrega toda a Grande Área de Estocolmo e outras empresas, como a própria Fortum e outras, como a alemã Eon, a Norrenergi e a Vattenfall (HAGLUND, 2017).

A complexidade e interligação entre as redes de distribuição de calor na região da Grande Área de Estocolmo pode ser conferida na Figura 21, em que se observa as redes inicialmente cobertas pela Fortum, Eon, Vattenfall, Norrenergi e Söderenergi:

Figura 21 – Província de Estocolmo e rede de distribuição de calor

Fonte: Magnusson (2010).

Essa complexidade também diz respeito à propriedade das empresas do setor. Um dos exemplos é a estrutura acionária da Söderenergi, em princípio uma estatal, mas com estrutura societária tão complexa que acaba parecendo uma empresa privada no que diz respeito à sua independência. Nessa estrutura societária, as prefeituras de Huddinge e Botkyrka têm, cada uma, metade de uma empresa de energia, a Södertörns Energi AB. Por outro lado, a prefeitura de Södertälje (onde fica a sede da Scania) possui outra empresa, a Telge AB. Essas duas empresas (Södertörns Energi AB e Telge AB) dividem a Söderenergi. Elas dividem igualmente a influência nas decisões, mas a Södertörns Energi AB possui 58% dos ativos da companhia e 42% pertencem à Telge AB.

Figura 22 – Planta de Södertälje da Söderenergi

Fonte: O autor (2017).

A missão da Söderenergi é focada nas questões ambientais, consequentemente, de acordo com essa política, suas atividades devem economizar recursos naturais, otimizar tecnologia para melhorar continuamente o meio ambiente e, por isso, priorizar combustíveis derivados de materiais residuais que não possam ser usados ou reciclados de uma maneira mais eficiente. Por essa razão, em 2016, a empresa usou como combustível 442 GWh de resíduos, 1.291 GWh de resíduos de madeira, 572 GWh de lascas florestais e 145 GWh de *pellets* de madeira, 24 GWh de licor negro (subproduto da indústria de papel e celulose) e apenas 34 GWh de óleo combustível, usado principalmente para dar o *start* nas plantas (HAGLUND, 2017).

Contudo, não foi sempre assim. Até 1991, Igelsta, a maior planta da empresa, usava praticamente carvão para produzir calor. A partir de 1994, começou a migração para combustíveis menos poluentes e mais renováveis. Atualmente, a planta possui três caldeiras de leito fluidizado, sendo que a primeira usa papel reciclado, madeira e plásticos não recicláveis peletizados. A segunda caldeira usa briquetes de madeira e casca. E a Terceira usa chips de madeira e *pellets* de papel reciclado, madeira e plástico.

As caldeiras podem tratar cerca de 1 milhão de toneladas ou 3 milhões de m³ de diferentes tipos de resíduos materiais, mas a qualidade desse material deve ser assegurada. Portanto, além de cláusulas contratuais rigorosas com os cerca de 40 fornecedores (cerca de 50% dos resíduos vem de fora: Reino Unido, Noruega, Holanda e Alemanha), a empresa dispõe de um cuidadoso sistema de controle de qualidade, com um equipamento de coleta de amostras automaticamente randomizado, para assegurar que os resíduos combustíveis estejam de acordo com os padrões estabelecidos nos contratos.

Figura 23 – Controle de qualidade na planta da Söderenergi

Fonte: O autor (2017).

Não obstante, o aproveitamento energético de resíduos via incineração tenha se aperfeiçoado, ao longo do tempo na Grande Área de Estocolmo, há uma grande pressão para que se aumente a separação dos resíduos alimentares para atingir a meta nacional. Nesse caso, os resíduos alimentares poderiam assegurar energia na forma de biogás. Isso porque, embora haja uma cadeia de biogás na cidade, com produção e consumo, a maior parte do biogás utilizado vem das plantas de tratamento de esgotos. Isso é diferente do restante do país. Em 2008, se na Suécia como um todo as plantas de tratamento de esgotos produziam cerca de 44% de toda a produção de biogás, na região de Estocolmo a produção de biogás era na época quase inteiramente suprida por plantas de tratamento de esgotos (ZABALETA, 2008).

Uma vez que o Plano Sueco de Gestão de Resíduos 2012-2017 introduziu objetivos para a separação e melhor prática com relação a resíduos alimentares, a atenção voltou-se para o aumento do biometano produzido a partir desse tipo de resíduos. E a região de Estocolmo que, diferentemente de outras do país, não possuía um sistema consolidado, precisou correr atrás.

É nesse contexto que, em 2015, se instalou uma grande planta de biometano na cidade de Huddinge, ao sul de Estocolmo. A planta da Scandinavian Biogas da Figura 24, empresa puramente privada, pode processar 70 mil toneladas de resíduos alimentares por ano. Contudo, em 2017, processava apenas 55 mil toneladas, apesar de a planta adicionar mais cinco toneladas de glicerol e gordura para alcançar a produção final de oito milhões de metros cúbicos anuais para movimentar caminhões e ônibus da região e produzir 16 mil toneladas de fertilizantes.

Figura 24 – Planta de biometano da Scandinavian Biogas

Fonte: O autor (2017).

A eficiência da planta pode entregar um metro cúbico de biometano para cada 4,5 kg de resíduos alimentares. Não obstante, a planta não funciona em plena carga. Isso, apesar de o sistema de separação já estar implantado (TULLBERG, 2017). De acordo com o Sistema, existem três caminhos de separação. No primeiro, o cidadão separa, em um saco de papel ou de amido, que depois será recolhido em uma lixeira separada por um caminhão movido a biogás. No segundo, existe um compartimento num sistema de coleta por vácuo. No terceiro, há residências que têm trituradores de alimentos instalados em suas cozinhas, com ligação direta ao sistema de esgotos onde se produzirá biogás (não de forma muito eficiente), ou ligados a um compartimento separado (ÖSTERLIN, 2012).

O principal consumidor do biogás para veículos em Estocolmo é a Stockholms Lokaltrafik (SL), a companhia de transporte da província. No início dos anos 2000, a empresa, que é propriedade do Conselho Provincial de Estocolmo, estabeleceu um programa ambiental com uma visão de longo prazo de desenvolver uma frota de ônibus totalmente livre de combustíveis fósseis. A empresa é responsável por operar aproximadamente dois mil ônibus na região de Estocolmo (JONERHOLM, 2012).

Não obstante, há outros consumidores importantes de biogás para transportes, como os caminhões de coleta e o serviço de táxi. Em 2011, a Taxi Stockholm estava operando mais de 1100 carros de biogás (ÖSTERLIN, 2012).

Apesar dessa visão de descarbonização datar da década passada, as primeiras iniciativas de combustíveis renováveis datam da década de 1980 (MOKTAN, 2013), pós-crise do petróleo. No começo, a primeira opção era rodar veículos com etanol. Para tanto, Stockholms Läns Landsting (SL) iniciou uma cooperação com outras cidades para fomentar o desenvolvimento e implementação dos ônibus a etanol, mas a iniciativa foi malsucedida, em função da falta de um mercado e infraestrutura para o biocombustível. Desde então, a empresa buscou outras alternativas, o biogás foi uma delas (JONERHOLM, 2012).

A maior planta de tratamento de esgotos de Estocolmo, a Henriksdal, de propriedade da Stockholm Water Company, produz biogás por mais de 80 anos, inicialmente apenas para estabilizar o lodo gerado da limpeza do esgoto, sendo o biogás, no caso, apenas um subproduto. Depois de estudos e negociações entre a SL e a companhia de Água, ficou decidido que esse biogás poderia ser purificado e distribuído, via canalização, para a garagem de ônibus da SL em Söderhallen, próximo à estação de tratamento (JONERHOLM, 2012).

O que começou com uma frota abastecida por biometano de 15-30 ônibus no ano de 2004, se expandiu para cerca de 100 ônibus em 2009. Em 2010, outra estação de tratamento de esgotos, a Kämpala Waste Waterment Plant (WWTP), começou a abastecer outra garagem de ônibus. Em junho de 2012, havia mais de 250 ônibus movidos a biometano rodando nas ruas de Estocolmo e quatro garagens de ônibus com estações de abastecimento (JONERHOLM, 2012).

Ao mesmo tempo, foi criada uma rede de distribuição de gás para as garagens de ônibus. A empresa de distribuição de gás, a Stockholm Gas, tinha uma rede para abastecer algumas indústrias e fornos residenciais, mas a rede não era apropriada para a distribuição veicular. Logo, instalou uma rede separada especialmente dedicada para entregar gás às garagens de ônibus e postos de abastecimentos públicos. A rede de distribuição de biogás se estende sob a terra e, em parte, sob a água, por aproximadamente 60 km (JONERHOLM, 2012).

O Conselho da Província de Estocolmo estabeleceu metas ambientais para a empresa de transporte, incentivando a transição, para eliminar o uso de combustíveis fósseis. À SL foram atribuídas metas difíceis como: ao menos 75 % da frota da empresa rodando com renováveis até o fim de 2016; e 100 % rodando com renováveis em 2025 (JONERHOLM, 2012).

Em 2010, o consumo de gás dos veículos da Província de Estocolmo foi de 13 milhões Nm^3 (126 GWh) de biogás e 4,5 milhões de Nm^3 (48 GWh) de gás natural, e a SL foi a maior consumidora (JONERHOLM, 2012).

Em 2011, existia já 230 ônibus a biogás nas ruas de Estocolmo, mas outras soluções de transporte de baixo carbono também foram usadas. No final de 2015, a proporção de ônibus rodando com biogás, etanol ou biodiesel representava 90% dos 2.200 ônibus da SL (STOCKHOLMS LÄNS LANDSTING, 2016). Com isso, praticamente alcançou-se a meta que a SL estabeleceu a si mesma para 2025: ter todos os ônibus rodando com combustíveis renováveis e ambientalmente amigáveis (ÖSTERLIN, 2012).

Com relação aos custos operacionais para ônibus movidos a biogás, diminuíram consideravelmente desde que foram introduzidos na província. Em 2012, já estavam nos níveis dos custos operacionais do diesel, se desconsiderados os custos de infraestrutura. Considerando os custos de infraestrutura, os custos operacionais dos ônibus a biogás eram de 5 a 8% maiores àquela altura (JONERHOLM, 2012).

Na região, a principal fonte de geração de biogás são as estações de tratamento de esgotos: as quatro maiores, Henriksdal, Käppala, Bromma e Himmerfjärdsverket, constituem a base da produção de biogás na província. Em 2012, por se basear quase que exclusivamente nesse substrato, a demanda superou a oferta, exigindo uma importação do gás combustível de outras regiões e o uso do gás natural como *back up* (JONERHOLM, 2012).

A partir daí novas fontes de biogás foram pesquisadas, entre elas a do potencial residual de aterros e resíduos alimentares. Para tanto, em 2009, a empresa de ônibus (SL) e a empresa de resíduos (Telge Recycling) realizaram um estudo de viabilidade, analisando, por exemplo, se seria economicamente viável limpar e purificar o biogás produzido no aterro “Tveta” para abastecer veículos e a garagem da SL próxima do local.

O resultado mostrou que a quantidade de gás de aterro possível durante os cinco primeiros anos (a partir de 2009) variavam entre 4,5 a 3 milhões de m³ de gás bruto (não purificado), enquanto no período de seis a dez anos, a partir da data inicial, era estimado 2,5 a 1,8 milhões de m³ por ano; e, entre 11 e 15 anos, somente 1,5-1,0 milhões de m³ por ano. Sendo que os cálculos, foram estimados com uma taxa de extração de 80% (JONERHOLM, 2012).

Nesse contexto, se planejou e instalou a planta de Huddinge, da Scandinavian Biogas, de tratamento de resíduos alimentares, que se mostrou mais adequada para atender tanto a demanda de biogás quanto a de redução do desperdício de resíduos alimentares.

4.1.2 Gotemburgo e a apresentação de soluções sustentáveis

Na segunda maior cidade da Suécia, Gotemburgo, um projeto tinha o objetivo de eliminar a desconfiança na capacidade de produção de biometano no país, para consolidar definitivamente tal mercado, uma vez que uma das principais questões desse mercado é assegurar o suprimento de biogás e dar confiança aos consumidores. Por isso foi criado o Projeto GoBiGas ou (*Gothenburg Biomass Gasification Project*), que pretendia produzir gás para abastecer entre 80 mil e 100 mil carros por todo o ano, reduzindo o risco de falta de abastecimento. O projeto, baseado na geração de metano por meio da gaseificação de madeira, embora não seja baseado em resíduos alimentares, poderia oferecer segurança para o mercado e consequente aumento da frota (GUNNARSSON, 2017).

A primeira fase do projeto foi construída na região de Hisingen e, aberto desde março de 2014, já produz 20 MW de biometano. Entretanto, as outras fases do projeto que previam uma produção de larga escala (100 MW) não foram adiante por decisão do conselho Göteborg Energi, que é a companhia municipal de energia, em função dos baixos preços do biometano (GUNNARSSON, 2017).

Essa decisão do Conselho parece contraditória com a imagem que a cidade se esforça para vender. O município faz um grande esforço para demonstrar um perfil plenamente voltado para o desenvolvimento tecnológico ambientalmente responsável. A prefeitura, a propósito, tem um produto turístico exclusivamente para apresentar as tecnologias e os casos desenvolvidos na cidade voltados para a sustentabilidade: o Green Gothenburg cuja capa do site está na Figura 25, que oferece programas de visitas para empresas e profissionais de outras nacionalidades conhecerem soluções desenvolvidas na cidade.

Entre os pacotes estão: Tour de Cidades Inteligentes, Safari de Resíduos, Eletro-Mobilidade, Energia Inteligente para Cidades e um outro que reúne Energia, Resíduos, Transporte e Desenvolvimento Urbano. O cliente também pode customizar os pacotes, conforme as suas necessidades. O preço, que inclui um dia de visita guiado e palestras, é de seis mil coroas suecas (cerca de 600 euros).

Figura 25 – Capa da página Green Gothenburg

Fonte: Green Gothenburg (2017).

Uma atração era o conjunto de plantas de Sävenäs, que reúne a planta de Göteborg Energi e a companhia de resíduos do Grupo Renova. O Grupo Renova é propriedade de dez municípios do oeste do país, além de Gotemburgo: Ale, Härryda, Kungälv, Lerum, Mölndal, Partille, Stenungsund, Tjörn e Öckerö são os proprietários da empresa que tem licença para receber 550 mil toneladas de resíduos em Sävenäs, sua planta de recuperação energética.

Quase metade dos resíduos vem de residências e a outra metade vem de negócios e outras atividades. Enquanto a matriz trabalha com a licença de resíduos dos dez municípios, a subsidiária Renova Miljö AB opera no mercado competitivo, oferecendo soluções de gestão de resíduos e reciclagens para negócios, prefeituras e empresas públicas da região (RENOVA, 2017).

A planta de Sävenäs queima os resíduos em quatro caldeiras, cada uma com seu próprio sistema de limpeza dos gases. A energia recuperada abastece aproximadamente 30% do calor necessário para a rede de aquecimento da cidade de Gotemburgo e aproximadamente 5% da eletricidade usada na cidade, ou seja, calor para 150 mil residências e eletricidade para 110 mil residências a cada ano (RENOVA, 2017).

Os focos de atenção da planta para alcançar eficiência e redução de emissões de poluentes estão no controle da mistura do combustível, injeção de ar e o controle da temperatura para a combustão mais eficiente. Por isso, checagens diárias randomizadas são realizadas a fim de assegurar que os resíduos que chegam à planta são separados apropriadamente (RENOVA, 2017).

A planta roda 24 horas/7 dias, por todo ano, para atender a necessidade de tratamento dos resíduos, apenas em alguns dias do verão (quando a demanda por aquecimento cai) a empresa faz interrupções para manutenção das caldeiras, uma caldeira por vez. A empresa enfarda resíduos combustíveis de empresas e outras atividades e guarda para o período em que a demanda volta a subir, exigindo a capacidade total novamente.

Com relação a subprodutos, o resíduo da queima sai da caldeira como escória. Na planta de Tagene, aproximadamente dez mil toneladas de metais são separadas da escória e reusadas como matéria-prima. Do mesmo modo, as cinzas não tóxicas (*bottom ash*) são recicladas como material de construção (RENOVA, 2017).

De acordo com o padrão de eficiência da Renova, um quilo de resíduos queimados oferece calor para um banho de sete minutos e eletricidade para três horas de uso do computador. A companhia como um todo trabalha atualmente em conjunto com as prefeituras na gestão de resíduos e reciclagem, de acordo com as metas regionais e nacionais, baseadas na hierarquia de resíduos europeia.

Mas os primeiros passos em direção à melhora no uso dos materiais residuais foram tomados ainda nos anos 1960, quando as prefeituras da região de Gotemburgo decidiram juntar esforços para construir a planta de recuperação energética de Sävenäs. Em 1972, depois de inaugurada a planta, grande parte dos resíduos da região deixou de ser aterrada e passou a ter a sua energia recuperada (RENOVA, 2017).

Desde então, conforme a consciência ambiental crescia, a eficiência da planta aumentava e o impacto ambiental diminuía. Atualmente, a planta extrai três vezes mais energia de cada tonelada de resíduos, comparada com a recém-inaugurada planta do início dos anos 1970. No que diz respeito à redução da poluição, desde 1980 as emissões da planta reduziram entre 90 e 99%, mesmo considerando o aumento dos resíduos.

O desenvolvimento tecnológico para chegar a padrões mais estritos melhorou consideravelmente a limpeza dos gases efluentes. A melhor separação dos resíduos também teve o seu papel. Desde 2006, a legislação europeia de emissões a partir de resíduos vigora e a planta Sävenäs atende às especificações e vem reduzindo consideravelmente as emissões, como pode ser verificado na Tabela 16:

Tabela 16 – Redução das emissões da planta Sävenäs, da Renova

Ano	Particulados (tonelada/ano)	Cloreto de Hidrogênio (tonelada/ano)	Dióxido de Enxofre (tonelada/ano)	Nitrogênio (tonelada/ano)	Queimado (quilo toneladas/ano)
1992	8.6	31.3	287	490	283.4
1993	14	62.5	293	239	291.1
1997	6.8	44	431	206	381.4
1999	4.7	29	407	190	373.1
2000	2.6	10	90	168	368.1
2001	3.2	10	68	144	352.1
2002	3.4	11	106	163	419
2003	3.0	4.1	30	158	401.9
2004	3.3	5.0	36	162	433.7
2005	4.7	5.4	36	156	436.3
2006	4.7	1.9	49	176	438
2007	3.1	1.4	29	168	444.1
2008	2.4	0.8	22	169	453
2009	2.0	0.8	59	164	446.5
2010	0.8	1.1	46	181	539.1
2011	0.6	0.6	9	179	535.8
2012	0.7	0.6	8	184	542.5

Fonte: Renova (2017).

A separação e a reciclagem são questões críticas tanto para a limpeza dos gases quanto para a eficiência energética. Por exemplo, resíduos perigosos precisam ser separados para não chegar à planta de recuperação energética. Diferentes componentes de resíduos perigosos, como metais pesados, são problemas para a fase da limpeza de gases. Do mesmo modo, gesso e argamassa, que contêm enxofre, não podem ser queimados. Restos de alimentos são mais apropriados para produzir biogás, processo que recupera nutrientes para o solo. Embalagem e papéis podem ser reciclados em novos materiais.

Durante o período de existência da Sävenäs, as preocupações com o clima emergiram e impulsionaram a substituição dos combustíveis fósseis. A queima de resíduos foi entendida como uma forma eficiente de substituição dos combustíveis fósseis, uma vez que dois terços dos resíduos são de origem não-fóssil. A empresa recebe certificados de eletricidade renovável de 40% da sua geração total (RENOVA, 2017).

A maior parte do resíduo queimado para recuperação energética vem da região de Gotemburgo, quando há capacidade ociosa, a planta também recebe resíduos de outras regiões ou países que precisam evitar o aterramento. O Plano de Resíduos 2020, da região de Gotemburgo, estabelece que o volume de resíduos por habitante não pode exceder o volume de 2008, cerca de 450 a 500 kg, anualmente por pessoa (RENOVA, 2017).

A Renova trabalha em P&D para melhorar seu desempenho em alguns processos, como extração maior de metais e nutrientes, por exemplo, fósforo da escória e das cinzas. Testes estão em progresso para recuperar zinco e cobre das cinzas, o que poderia levar à recuperação de valiosos metais e cinzas menos poluídas. Pesquisadores também trabalham na purificação do fósforo recuperado para seu melhor uso e em materiais resistentes à altas temperaturas, a fim de aumentar a eficiência do processo de queima (RENOVA, 2017).

Além disso, a empresa tem parcerias de pesquisa e desenvolvimento com a Waste Refinery, um centro de excelência para a conversão ótima dos materiais residuais; as iniciativas Avfall Sverige R&D, projetos de P&D com a associação sueca de resíduos; o instituto Thermal Engineering Research Institute, P&D em combustíveis para produção de calor e eletricidade; a HTC, o centro sueco de pesquisa especializado em corrosão em altas temperaturas; a FRIST, o fórum para investigação de risco e tratamento do solo; e a POWRES, instituto interdisciplinar de P&D em resíduos na Suécia.

Além disso, há projetos em colaboração com outras companhias, como Gotaverken Miljö e Siemens, e bolsas anuais de SEK 50,000 para jovens pesquisadores e candidatos a doutores na área de ciências ambientais, nas universidades de Gotemburgo e Chalmers, para pesquisas relacionadas às atividades da Renova, sendo que pesquisas de mestrado e doutorado podem ser desenvolvida nas instalações da própria empresa. A primeira bolsa foi concedida em 2003 (RENOVA 2017).

A maioria do transporte de resíduos é realizada em veículos próprios da Renova, já que na quantificação das emissões da atividade licença (segundo a licença, de acordo com o Código Ambiental Sueco) da planta de aproveitamento energético de resíduos inclui a atividade de transporte dos mesmos. Portanto, a empresa tem trabalhado com montadoras para o desenvolvimento de veículos eficientes e ambientalmente amigáveis.

Por exemplo, foi a primeira empresa do mundo a coletar resíduos utilizando um veículo híbrido abastecido tanto por eletricidade e biodiesel, sendo que a compressão é realizada apenas com eletricidade. Uma vez que esses veículos são silenciosos e livres de combustíveis fósseis, rodam no centro da cidade de Gotemburgo. Outros exemplos são os veículos que rodam tanto com biometano como diesel, e o veículo que, abastecido por biogás líquido (LBG), transporta a escória da planta de incineração para a planta de separação de Tagene.

A evolução da redução da pegada de carbono do setor de transporte da empresa avançou consideravelmente nos últimos anos. Se, em 2013, aproximadamente 80% usava fontes renováveis, em 2017, todos os 220 veículos da empresa usam combustíveis renováveis (RENOVA, 2014; 2017).

A maioria, porém, usa um tipo de biodiesel feito a partir de óleo vegetal hidrogenado (HVO) que reduz as emissões em 90% comparado ao diesel convencional. Cerca de 30 dos veículos pesados rodam completa ou parcialmente com biometano e um veículo usa biometano líquido. Além disso, há o esforço para racionalização logística a fim de reduzir as emissões: os veículos de coleta depositam em uma área de transbordo onde são carregados por caminhões containers que então transportam os resíduos para a estação de recuperação energética de resíduos.

Um caminhão container pode carregar de oito a nove vezes o que carrega um veículo de coleta, reduzindo, portanto, consideravelmente as emissões. Todos os veículos têm a rota planejada por um software proprietário que ajuda a empresa para carregamentos eficientes. Além disso, a empresa possui uma política de manutenção dos veículos voltadas para a eficiência e redução do impacto ambiental, incluindo uma tecnologia de lavagem ambientalmente amigável (RENOVA 2017).

Além de buscar a redução das emissões de seu próprio setor de transporte, a empresa contribui para a redução do setor de transporte como um todo, pré-tratando os resíduos alimentares separados pelos habitantes da região em sua planta de Marieholm, onde se produz a matéria-prima para a geração de biogás.

Apesar de a empresa ressaltar a importância do biogás, demonstrando, em suas peças institucionais, a importância dele e afirmando que cada pessoa gera 100 kg de resíduos alimentares por ano, o suficiente para abastecer um carro comum por 133km, a empresa não possui uma planta de biogás, entregando a matéria-prima para a planta de Falkenberg da Falkenbergs Biogas, 100 km ao sul da planta de pré-tratamento (HOPPE *et al.*, 2017).

Além da incineração, a empresa (cujo faturamento é de SEK 1.140 milhões, emprega 780 funcionários, trata no total 830 mil toneladas de resíduos, produz 1.504 mil MWh de calor e 270 mil MWh) oferece uma vasta gama de serviços relacionados a resíduos, todos focando a hierarquia de resíduos.

Na própria planta de incineração, existe a preparação e a separação de resíduos, recepção de resíduos eletrônicos; uma planta específica para cremação de animais de estimação, uma área específica para recepção de resíduos perigosos não habilitados para ser incinerados, um Centro de Meio Ambiente para estudantes; na planta de Marieholm há o pré-tratamento dos resíduos alimentares; nas plantas de separação e reciclagem de Högsbo e Skräppekärr, há a separação de resíduos de construção e outros resíduos comerciais; centros de reciclagem em várias cidades; recepção de resíduos perigosos em Ringön, plantas de transbordo e alguns aterros e aterros em Tagene (Gotemburgo) e Fläskebo (Härryda) (RENOVA, 2017).

4.1.3 Malmö e o foco no *District Heating*

A terceira maior cidade da Suécia é Malmö, com pouco mais de 300 mil habitantes. Seu serviço de gerenciamento de resíduos é feito pela empresa Sysav. Seu nome completo é Sydkånes Avfallsaktiebolag (ou Companhia de Gerenciamento de Resíduos do Sul da Escânia) e a empresa é propriedade de 14 municípios do sul da Escânia: Burlöv, Kävlinge, Lomma, Lund, Malmö, Simrishamn, Sjöbo, Skurup, Staffanstorps, Svedala, Tomelilla, Trelleborg, Vellinge e Ystad. Anualmente, cada indivíduo morador das cidades proprietárias da empresa produz 276 kg coletados pela empresa e mais 234 kg são deixados em centros de reciclagens pelos moradores.

A licença da Sysav foi emitida pela Corte Ambiental para tratar 550 mil toneladas de resíduos em sua planta de recuperação energética. Todo ano a empresa envia uma lista de suas operações, com os controles ambientais e as fiscalizações realizadas pelas autoridades ambientais. A empresa precisa também reportar todas as não-conformidades.

A empresa tem duas subsidiárias: a Sysav Industri AB e Sysav Utveckling AB. A matriz gerencia e trata os resíduos sólidos das cidades proprietárias, enquanto a Sysav Industri AB cuida de resíduos industriais e comerciais, assim como resíduos sólidos, urbanos, combustíveis de outras cidades diferentes das proprietárias.

Por sua vez, a Sysav Utveckling AB, empresa dedicada à Pesquisa e Desenvolvimento, financia projetos com o objetivo de desenvolver e melhorar as tecnologias existentes, bem como financia novos métodos e tecnologias no setor de gestão de resíduos. Além disso, o Grupo Sysav inclui três outras empresas associadas: ÅGAB Syd AB, KS Recycling AB and Carl F AB.

Como um todo, o Grupo Sysav tem 294 empregados, sendo 265 em tempo integral. Em 2015, o Grupo faturou SEK 842,9 milhões (contra 817,8 milhões em 2014), operou lucros de SEK 64,1 milhões (56,2 milhões em 2014). Os ativos totais decresceram ligeiramente para SEK 2.170,7 milhões (2.202,7 em 2014), sem considerar a recente linha 4 que, em sistema de leasing, é reconhecida como despesa externa. As despesas com imposto de resíduos – cujos preços em 2015 estavam SEK 500 (435 in 2014) por tonelada – alcançaram SEK 8,9 milhões (4,0, em 2014) durante o ano.

Em 2015, 42,5% dos resíduos que entraram em suas plantas foram reciclados em novos materiais, 55,5% destes tiveram a sua energia recuperada e somente 2% foi enviado a aterros. A empresa possui quatro plantas e uma estação distribuídas em toda a região do sul da Escânia. O processamento, a separação e o recarregamento de resíduos ocorrem nessas plantas. Duas delas possuem aterros

Em 2015, o Grupo Sysav (sem contar os volumes da companhia associada ÅGAB) recebeu, de um modo geral, o total de 854.700 toneladas, menos do que 2014 (892.200), fato atribuído a menos resíduos vindos de outros países. Desse volume, foram incinerados com recuperação energética um total de 569.700 toneladas de resíduos, mais do que em 2014 (553.500). Essa incineração possibilitou um recorde na energia entregue: 1.465 (1.394) GWh de aquecimento e 168 (158) GWh de eletricidade, entregues para a empresa de eletricidade E.ON.

4.1.3.1 A Planta de Recuperação Energética

A Planta de Spillepeng é uma península artificial situada ao norte da cidade de Malmö, que se estende ligeiramente para o canal de Öresund, que separa Suécia e Dinamarca. Construída na década de 1990, é a única planta da Suécia que ganha terreno do mar e usa terra de outros terrenos e materiais de construção. A terraplanagem usou várias camadas de argila, geotêxteis, pedras e pedregulhos para torná-la impermeável e durável.

Figura 26 – Planta de recuperação energética da Sysav localizada em Spillepeng

Fonte: O autor (2017).

O fundo da planta se situa de dois a três metros abaixo do mar, fazendo com que a diferença de pressão não deixe que a água dos aterros escorra para o mar em caso de acidente. Na planta há equipamentos para preparação (devido a sua consistência alguns resíduos são mais difíceis de queimar e passam por um tratamento anterior) e armazenagem (nos períodos de verão, como a demanda por calor cai, a incineradora de resíduos usa menos resíduos e precisa armazená-los, por isso usa compactadores) de combustível e separação de escória. Há dois aterros, um para resíduos perigosos e um para resíduos do tratamento do lixo comum. Nas proximidades da planta, há uma área industrial e uma reserva natural com grande quantidade de pássaros.

Mas a grande construção é a incineradora que tem quatro caldeiras. As duas primeiras entraram em operação ainda em 1973, para produzir calor distrital (*District Heating*). Embora antigas, as caldeiras dispõem de sistemas de limpeza de gases que foram reformados, reconicionados e atualizados, de acordo com os padrões atualmente exigidos. São caldeiras de água quente que têm, cada uma, a capacidade de tratamento de 100 mil toneladas de resíduos por ano.

Em 2003, entrou em funcionamento a primeira caldeira (de vapor) moderna e, em 2008, a segunda. Ambas produzem (além do calor) cerca de 250.000 MWh de eletricidade por ano. Como um todo (incluindo as primeiras caldeiras), a planta tem licença para tratar 630 mil toneladas de resíduos como combustível e, com isso, produz 1.400.000 MWh (o equivalente a aquecer 70 mil pequenas casas) por ano.

Há significativas diferenças entre tecnologias de caldeiras de água quente e vapor. As duas caldeiras de vapor têm um depósito comum onde os caminhões depositam os resíduos. Existe um único guindaste operado de um centro de controle com uma garra que leva os resíduos para as calhas que alimentam as caldeiras. A fornalha reúne grelhas com áreas de 100 m². Os resíduos escorrem pelas grelhas de ação reversa, onde são secados evaporados e queimados.

As barras da grelha movem os resíduos para cima e para baixo para remexê-los, garantindo a queima ótima. Com o objetivo de assegurar a queima completa, são injetados ar primário e secundário na caldeira. O ar primário é soprado de baixo, por entre as barras da grelha, enquanto o ar secundário é soprado sobre o combustível, para ajudar na mistura do combustível e alcançar a combustão ótima.

Normalmente, a temperatura na fornalha da caldeira alcança mais de 1.000°C. Durante a ignição ou o encerramento, quando a energia contida nos resíduos não é suficiente para alcançar essa temperatura, uma combustão auxiliar com óleo é utilizada, mas na operação normal das caldeiras apenas resíduos são utilizados.

Os gases resultantes da combustão passam por três dutos verticais com tubos nas paredes onde a temperatura é alta. A função dos dutos é assegurar a completa combustão dos gases efluentes. Estes, com a temperatura de 850°C, aquecem a água circulando nos tubos. Na parte horizontal da caldeira, tubos de convecção e superaquecedores, a água alcança uma temperatura

de 400°C à pressão de 40 bar. O vapor da caldeira é levado para a turbina que movimenta o gerador.

Parte da eletricidade produzida é usada na planta, enquanto o restante é distribuído na rede. Depois disso, o vapor chega ao condensador onde é usado para aquecer a água do *District Heating*. O condensador é um grande trocador de calor que condensa o vapor conforme o calor é transferido para a água do sistema de aquecimento das residências e prédios.

Nesse sistema, a água é aquecida para alcançar entre 80-115°C. Depois de aquecer a água do *District Heating*, ela é bombeada de volta para a caldeira. Quando a água retorna do sistema de District Heating à planta, chega com uma temperatura entre 40 e 60°C, e seu calor é usado para aquecer, entre 5-10°C, novamente a água que será circulada na caldeira. O gás residual da incineração também tem o calor recuperado antes de sair pela chaminé.

Com relação aos resíduos, uma vez que atravessam a grelha tornam-se escória e caem num compartimento com água para resfriamento. A escória, basicamente formada por materiais estáveis, como metais e vidro, é alocada num compartimento para ser posteriormente ser reciclada. Já o gás residual é tratado em fases: na primeira, um precipitador eletrostático remove a maioria da poeira.

No tratamento de gases, na primeira fase um precipitador eletrostático remove a maioria do material particulado. As partículas que recebem uma carga negativa dos eletrodos ficam presas em metais carregados com carga positiva. Essas placas metálicas são sacudidas em períodos regulares. Quando o gás sai do filtro eletrostático, as partículas contidas no gás, menores que 20 mg/m³, são coletadas e destinadas. A cada 100 kg de resíduos, 3kg de cinzas e lodo permanecem depois da combustão.

Outros estágios para os gases são o filtro *electroventuri*, que funciona mais ou menos como o precipitador eletrostático, mas em ambiente úmido. É nesse estágio que a poeira remanescente é removida. O filtro *electroventuri* é composto por 24 dutos, as partículas são carregadas negativamente por um eletrodo e então absorvidas por um spray de água positivamente carregado. A água com as partículas é encaminhada para a planta de tratamento de água.

O estágio final do processo de limpeza é o catalizador que trata óxidos nitrosos. Neste, os gases passam por um material cerâmico onde é injetada amônia líquida. O óxido nitroso

reage com a amônia e é reduzido a nitrogênio e vapor. A água residual desses estágios úmidos de tratamento é tratada com adição de químicos, para que metais pesados e outros contaminantes possam precipitar, numa série de tanques em que se formam sedimentos e concentrados num lodo.

Por seu lado, as velhas caldeiras a água usam processos diferentes. Aquecem a água a 150°C que, por meio de dois trocadores de calor, levam energia térmica para o *District Heating*. O calor dos gases residuais também é recuperado por um economizador. O Sistema de limpeza de gases dessa rota possui estágios úmidos e secos. O primeiro passo consiste em borrifar amônia diretamente nas caldeiras para reduzir a formação de óxidos de nitrogênio. Depois, usa-se cal para neutralizar substâncias ácidas e, em seguida, um filtro manga retém as partículas do gás efluente.

Os gases então entram na fase úmida e passam por um *scrubber* de quatro fases. A as duas primeiras removem cloretos e fluoretos, metais e amônia; a terceira remove dióxido de enxofre; e a quarta é a condensação. Cada estágio envolve um leito de material de carbono saturado que absorve dioxinas e aumenta o contato da superfície entre a água e o contaminante. O calor gerado no estágio de condensação é aproveitado e transferido para a rede de District Heating, por meio de trocador de calor, e a água residual dos estágios úmidos é tratada de acordo com o contaminante removido.

De 15-20% do peso dos resíduos tratados permanece na forma de escória, que é transportada para as proximidades onde são recuperados ferros e outros metais. O restante pode ser usado como material de construção. As cinzas secas capturadas em caldeiras, precipitadores eletrostáticos e filtros-manga, bem como os lodos das fases úmidas, que contêm contaminantes como metais pesados, precisam ser aterrados em células especiais do aterro anexo.

De todos os resíduos que chegam às plantas da Sysav, somente 4% vai para aterros. E a empresa ainda trabalha para reduzir muito mais essa taxa de aterramento, procurando novos métodos de reciclagem e usando novos tipos de materiais. Mesmo assim a empresa possui aterros para resíduos perigosos e não perigosos.

O chorume (água de chuva e neve contaminada pelos resíduos) recuperado desses aterros são tratados. Nas plantas de Hedeskoga and Måsalycke, esse chorume é aproveitado para irrigação em florestas energéticas. Nestas, os compostos de nitrogênio são absorvidos pelos troncos das árvores, que, posteriormente, são usadas como combustíveis.

A sala de controle central monitora continuamente os processos da planta, queima, produção de vapor, eletricidade e District Heating. Além disso, são medidas permanentemente as emissões, de modo que não ultrapassem os limites exigidos pelas autoridades. Regularmente são colhidas amostras do solo para análise de cursos d'água e lençóis freáticos, seguindo testes estabelecidos pela autoridade responsável (em geral o Comitê da Província). Em eventos extraordinários ou mudanças de atividades, a empresa precisa reportar à autoridade.

4.1.3.2 Matéria-prima para biometano

Para melhorar o aproveitamento energético e também os nutrientes dos resíduos orgânicos, as cidades proprietárias da Sysav se mobilizaram para organizar a coleta e separação dos resíduos alimentares das residências, cozinhas de grande escala, restaurantes, docerias e padarias.

Em 2009, a empresa começou a operar uma planta de pré-tratamento para resíduos alimentares. No começo de 2015, a empresa decidiu construir uma planta de digestão anaeróbica, mas essa iniciativa foi cancelada por causa da baixa no Mercado de biogás, o que tornou a iniciativa pouco econômica, optando por melhorar a eficiência da planta de pré-tratamento.

Em 2015, uma quantidade de 39.861 (36.038, em 2014) toneladas de resíduos alimentares foi recebida das residências, lojas e restaurantes. Segundo as diretrizes governamentais, essa fração dos resíduos deve ser tratada de forma biológica. Os resíduos pré-tratados saem na forma de um produto viscoso, bombeável e pronto para a digestão anaeróbica. Tal produto então é enviado para a planta de biometano da C4Energy, na cidade de Kristianstad, aproximadamente a 90 km de Malmö.

A planta de pré-tratamento tem três linhas: duas para resíduos alimentares líquidos e outra para pré-embalados resíduos em pallets. Os resíduos bombeáveis, que podem vir de moendas e separadores de gordura e cozinhas de grande escala, chegam por caminhões tanques e é depositado num tanque de recepção. Depois, é bombeado para um tanque intermediário, onde pedras e grãos são removidos para um tanque de recepção.

Parte da planta lida com resíduos alimentares líquidos embalados por plástico ou papel. Esse tipo de resíduos vem principalmente de produtores de alimentos e atacadistas. Na planta, a embalagem é perfurada e espremida. Então o líquido espirra e escorre para um tanque coletor. Esse processo é feito em lotes, as embalagens comprimidas são transportadas por uma correia e chegam na planta de recuperação energética da Sysav.

Entretanto, a maior parte dos resíduos alimentares compõe-se de sólidos, incluindo-se os resíduos separados nas residências, restaurantes, lojas e cozinhas industriais. Nesse caso, o pré-tratamento usa uma extrusora parafuso. Os resíduos entram em um repositório em que a tampa só permanece aberta durante o depósito dos resíduos, com o objetivo de evitar o mal cheiro no ambiente. Em seguida, os resíduos são encaminhados para um setor em que passam por três rolos de fresagem.

Os resíduos são picotados em pequenos pedaços por uma lâmina rotativa. Em seguida, são levados para um misturador, que os deixa homogêneos, então, passam por uma extrusora parafuso, e este espreme os resíduos num cone que oferece a contrapressão. A pasta viscosa escorre por buracos na lateral. A parte restante de resíduos não transformada no líquido é levada para a planta de recuperação energética, enquanto o líquido viscoso é coletado num tanque de 200 m³, equipado com agitadores para evitar a sedimentação. Então, o líquido é levado para a planta de biogás de Kristanstad.

4.1.3.3 Medidas de reciclagem e preparação para o futuro

Adicionalmente, em 2015, a Sysav tomou três medidas voltadas para a economia circular: a) instalou um centro de reciclagem em Norra Hamnen, para ser um ponto de coleta de reuso, cuja ideia é provocar os consumidores a pensar que aquilo que poderia ser jogado fora pode ser usado novamente; b) desenvolveu a campanha “*Four Fit Challenge*”, contabilizando o impacto da cultura de “jogar fora” as roupas, já que cada quilo de tecido reciclado economiza o equivalente a sete quilos de emissões de carbono; c) publicou em seu site dicas e conselhos para ajudar o público a pensar em alternativas antes de jogar alguma coisa fora.

Com relação à preparação para os desafios do futuro, a empresa Sysav focou em pesquisa e desenvolvimento. O braço Utveckling AB da empresa anunciou um prêmio anual a projetos de estudantes de destaque e bolsas, visando que outros possam desenvolver seus projetos em gestão de resíduos na empresa.

Também tem representação no Conselho da Faculdade de Engenharia da Universidade de Lund e colabora com a premiação de professores na área de economia industrial focada na estratégia tecnológica e modelos de negócios. A empresa também apoia o Centro Vattenhallen de Ciência e a Science Partnerskap Alnarp.

4.2 AS CIDADES MÉDIAS E SEUS DESAFIOS NA GESTÃO DE RSU

Consideram-se aqui as cidades com aproximadamente 100 mil habitantes, como cidades médias, mas elas poderiam, no contexto sueco, ser consideradas grandes, porque, dentre as dez cidades mais populosas, esse estudo não contemplou Uppsala (140 mil habitantes); Örebro (115 mil) e Norrköping (93 mil). Ou seja, a décima cidade sueca mais populosa já tem menos do que 100 mil habitantes. Realidade um pouco diferente da brasileira, em que as cidades dessa dimensão são consideradas pequenas.

O estudo então se debruça sobre quatro dessas cidades: Västerås (118 mil habitantes), Linköping (107 mil); Helsingborg (105 mil) e Jonköping (94 mil), visando conhecer os desafios e as estratégias dos municípios para encontrarem soluções de gestão de resíduos apropriadas para essas escalas.

4.2.1 Västerås: duas empresas para duas rotas

Embora, na maior parte dos casos, os resíduos é que motivaram o surgimento de plantas de recuperação energética, em Västerås a demanda por energia iniciou o processo. Isso porque a cidade é historicamente industrial, portanto tem alta demanda de energia.

A cidade, localizada às margens do lago Mälär, na Província de Västmanland, a 115 quilômetros de distância de Estocolmo, é a sexta maior cidade em população, com aproximadamente 140 mil habitantes. Cidade histórica, conhecida como o berço da Suécia moderna, já que o primeiro rei da Suécia moderna, Gustav Vasa, realizou duas sessões parlamentares que definiram aspectos do país que duram até hoje: em 1527, aboliu o catolicismo; em 1544, estabeleceu a monarquia hereditária do país. A primeira escola secundária do país também surgiu na cidade, em 1623.

Mas o maior protagonismo da cidade surgiu justamente no início da segunda Revolução Industrial, com o avanço da eletricidade. Os serviços públicos de energia foram inaugurados em 1861, mas ofereciam apenas 40 lâmpões a gás. Durante a segunda Revolução Industrial, a estatal de energia da cidade (que viria a ser a Mälarenergi) começou a oferecer não apenas eletricidade, mas também outros serviços como água e saneamento. A empresa foi se tornando progressivamente relevante na medida em que a cidade se industrializava. A principal indústria da cidade surgiu justamente nesse contexto, oferecendo tecnologia elétrica: a ASEA (que se tornaria ABB).

Em 1954, houve a introdução do sistema de aquecimento distrital (District Heating). Nove anos depois, em 1963, a atual planta Kraftvärmeverket foi inaugurada. Em 2000, a empresa municipal de energia se juntou a empresas das cidades de Hallstahammar, Kungsör e Surahammar, para formar a Mälarenergi. Atualmente, a empresa de propriedade da cidade de Västerås tem cerca de 700 empregados, com faturamento de SEK 3 bilhões de coroas suecas.

4.2.1.1 A Planta Kraftvärmeverket

Em 1963, a planta Kraftvärmeverket começou a operar com duas caldeiras (Block 1 e 2) convencionais para alimentar o sistema de aquecimento. Em 1969, a terceira caldeira (Block 3), uma planta de Cogeração (CHP), é colocada em operação. Em 1973, inaugura a quarta caldeira (Block 4), originalmente planejada para usar óleo como combustível, combinando a geração de calor (365 MW), eletricidade (220 MW) e condensação (250 MW).

Na década de 1970, a crise do petróleo causou a troca de combustível das duas primeiras caldeiras (1 e 2) de óleo para carvão, em 1981. O mesmo ocorreu com a quarta caldeira (4) em 1983. Em 1992, a cidade foi a primeira do país a produzir também frio (trigeração). Em 1998, iniciou a migração das caldeiras 1,2 e 4 para combustíveis de baixo-carbono e renováveis, como o licor negro, um subproduto residual da indústria papeleira.

Como consequência, a quarta caldeira reduziu a sua capacidade para 155M de eletricidade, 250MW de calor e 180 MW de condensação. Desde 2002, esta caldeira pode ser abastecida com *pellets* ou turfa, mantendo a mesma capacidade. Ainda no ano 2000, quando as empresas foram reorganizadas na Mälarergi, a empresa construiu a quinta caldeira (Block 5) que, junto com a quarta, substituíam os combustíveis fósseis na geração de base, deixando a queima de óleo somente nos momentos de pico. A geração total de biomassa (caldeiras 4 e 5) é de 210 MW de eletricidade e 400 MW de aquecimento distrital, com o condensador gerando 250 MW de eletricidade.

Somente em 2014, a sexta caldeira (Block 6) foi inaugurada para ser abastecida por resíduos sólidos urbanos. Essa caldeira é a maior e mais importante do conjunto e produz metade da necessidade de consumo de aquecimento da cidade de Västerås. Com sua flexibilidade, pode lidar com grande gama de combustíveis, mas o principal (e mais econômico porque eles recebem pelo serviço) combustível está nos resíduos sólidos urbanos.

A introdução de resíduos sólidos urbanos no mix energético reduz as emissões da empresa em 300 mil toneladas por ano, comparando com turfa, o que equivale às emissões de 100 mil carros.

Figura 27 – A sexta caldeira fica num prédio separado da Kraftvärmeverket

Fonte: O autor (2017).

A caldeira de recuperação energética de resíduos (Block 6) usa a tecnologia de leito fluidizado, portanto requer um pré-tratamento dos resíduos antes de ir para a queima. Os resíduos importados já estão embalados são recebidos e checados numa área de recepção. Depois, o resíduo é carregado em outra área onde guindastes misturam os que são carregados numa máquina chamada Tiranossauro que fraciona os resíduos em pequenos pedaços. Depois disso, metais, pedras, vidros e cerâmicas são separados e enviados para a reciclagem. Os resíduos, em pedaços pequenos e homogêneos, são carregados por uma correia fechada para a caldeira que fica em outro prédio.

A caldeira de leito fluidizado é preenchida por areia (que vem da região de Småland), de modo a alcançar uma temperatura estável e uma queima mais homogênea. A sua capacidade é de queimar cerca de 60 toneladas por hora, aquecendo e produzindo vapor, inicialmente a uma temperatura de 135°C. Depois, pelo calor transmitido pelos gases efluentes e novamente por leito de areia, chega a uma temperatura de 470 graus. Ao todo, a planta recupera energia de 480 mil toneladas de resíduos por ano.

O Sistema de limpeza dos gases usa carvão ativado, cal e água para formar partículas ácidas e metais pesados. Passando por uma mangueira filtrante, as partículas ficam retidas e são destinadas como resíduos perigosos. Os gases residuais são purificados por um scrubber que lava os gases. Aproveita-se também o calor desse processo para o District Heating. A água é reusada no início do tratamento dos gases residuais, e apenas uma pequena quantidade dessa água despejada no lago Mälaren. A fumaça remanescente é monitorada constantemente, para verificar a quantidade de poluentes, antes de ser levada para uma chaminé de 110 metros.

4.2.1.2 A planta de biometano

Por outro lado, a empresa que trata os resíduos da cidade, VafabMiljö, é propriedade dos municípios de toda a Província de Västmanland, cuja população é de aproximadamente 300 mil habitantes. A empresa possui 18 centros de reciclagem espalhados pela região, seis deles localizados na cidade de Västerås, onde está a sede da empresa. Além disso, tem várias plantas voltadas para o tratamento de resíduos, incluindo a planta de biometano, localizadas no bairro de Gryta, ao norte, em sentido contrário à planta de Mälarenergi.

A iniciativa dessa planta de biometano não era originalmente pensada para tratar resíduos sólidos urbanos, mas sim para tratar os resíduos orgânicos gerados pelas fazendas da região. Por isso, um dos sócios da planta, Mälarenergi e VafabMiljö, é a Federação Nacional de Fazendeiros Suecos (LRF). A ideia dessa planta foi concebida originalmente por fazendeiros da região, ainda em 1990.

Em 1995, decidiu-se combinar os resíduos agrícolas com resíduos sólidos urbanos. Em 1998, o planejamento da planta começou, mas a obra foi concluída em 2003, ano em que foi criada a empresa Svensk Vättekraft AB para operar a planta. Em 2004, decidiu-se também utilizar lodo de estação de tratamento em outra planta, e a produção piloto de biometano para transporte começou. No início de julho de 2005, a planta começou a funcionar plenamente.

Figura 28 – Controle de operações da planta de biometano da VafabMiljö

Fonte: O autor (2017).

Em 2008, entrou em operação a primeira estação de abastecimento de biometano; em 2009, a segunda; em 2010, a terceira. No mesmo ano foi aprovada a utilização do lodo residual como biofertilizante para as fazendas. Em 2012, a quarta estação de abastecimento entrou em operação e, no ano em que a VafabMiljö, empresa de resíduos do município incorporou a Svensk Växtkraft, a quinta estação foi inaugurada.

Diferentemente do preconcebido, os principais substratos utilizados na planta atualmente são resíduos alimentares. O biogás gerado no biodigestor local e o que vem da planta de tratamento de esgotos são purificados numa planta anexa ao biodigestor para serem utilizados como combustível em ônibus, caminhões coletores e carros. A produção total abastece ao menos 150 ônibus urbanos, dez caminhões coletores e ainda outros carros leves.

Para purificar o biogás, usa-se a técnica já consolidada do *scrubber* de água e avançados sistemas de medição e supervisão da qualidade do gás. A água usada no processo do primeiro scrubber é tratada, e o gás restante passa por um outro scrubber (químico) e, em seguida, por um biofiltro. A perda de metano no processo não chega a 2%, e o biogás excedente não vendido para o abastecimento de veículos é usado para a geração de energia elétrica e calor na própria planta de tratamento de resíduos de Gryta.

Ultimamente, a demanda da região por biogás tem crescido e há a necessidade de tratar os resíduos agrícolas que estão sendo armazenados no pátio da planta. Por essa razão, está sendo planejado um novo digestor anaeróbico na planta.

Para 2014, as informações-chave da planta contemplam uma capacidade de processamento anual de 17.189 toneladas de resíduos orgânicos de residências e cozinhas industriais com teor de matéria seca de aproximadamente 30%; 3.835 toneladas de resíduos líquidos como gorduras e óleos com teor de matéria seca de 4 %; e 780 toneladas de resíduos agrícolas com teor de matéria seca de 35%.

A produção total anual foi de 2.740 mil Nm³ de biogás de resíduos alimentares que, com mais 1.959 mil Nm³ da planta de estação de tratamento de esgotos, resultou em 3.100 mil Nm³ de gás purificado, o correspondente a 3,8 milhões de litros de gasolina. O processo também produziu 2.157 toneladas de biofertilizante com teor de matéria seca de 25 a 30%.

A separação de resíduos alimentares começou bem antes da planta de biometano. Em novembro de 1996, a província estabeleceu uma estratégia regional para lidar com resíduos orgânicos. A estratégia propunha assegurar alta qualidade de separação de resíduos orgânicos em pequenas sacolas de papéis combinadas com lixeiras de plásticos ventiladas para armazenar esse tipo de resíduos.

Três pequenas estações de compostagem e uma de biogás seriam instaladas na região, sendo que tanto o composto como o lodo resultantes do biodigestor deveriam ser usados prioritariamente como fertilizantes em terras aráveis para a produção de cereais e, em segundo caso, em substratos para solo em parques e jardins. Por último, em obras de restauração de áreas poluídas. A compostagem caseira também deveria ser promovida, especialmente em áreas rurais e cidades pequenas que ficassem longe das plantas de compostagem e biogás.

O sistema de separação na fonte nas residências e cozinhas institucionais foi introduzido em todas as cidades da região, durante o período 1997-2001. Até 2005, os resíduos coletados eram tratados em três pequenas plantas de compostagem, quando então a planta de biogás passou a receber esses resíduos. A separação na fonte é voluntária.

Os residentes são livres para escolher três formas alternativas de lidar com os resíduos orgânicos, todos impactando na tarifa de resíduos: participação em esquema de separação na fonte: o resíduo orgânico é tratado na planta de biogás; compostagem individual de baixa escala nos jardins e quintais; ausência de separação na fonte: o resíduo orgânico é coletado com resíduos de cozinha e tratado via incineração.

A escolha da alternativa pelo morador é confirmada por um contrato entre ele e a prefeitura. Se o morador aderir ao esquema (redução do imposto de resíduos), ele se compromete a separar, de acordo com as instruções da prefeitura, esta, por sua vez, tem o direito de controlar a qualidade dos resíduos separados.

Em 2014, cerca de 144 mil residências (aproximadamente 90%) da região participaram do esquema, 7% tomaram conta dos seus resíduos em sua compostagem de quintal; 3% não separam e seus resíduos acabam na planta de recuperação energética da MälarEnergi. As instruções do sistema de coleta dos resíduos orgânicos estão impressas nos sacos de papel entregues em cada residência.

Depois de cheios, os sacos são levados pelos moradores para lixeiras ventiladas plásticas, que, em distritos residenciais, são localizadas fora das residências. Há duas lixeiras, uma marrom e outra verde. As marrons são para resíduos orgânicos. Em áreas de apartamentos, geralmente são colocadas em lugares cobertos e específicos. Resíduos sólidos de cozinhas institucionais são operados do mesmo modo que os residenciais, enquanto líquidos, como gordura, são coletados por caminhões tanques e entregues direto na planta de biogás.

4.2.2 Linköping e a importância da Tekniska Verken

Linköping, cidade com pouco mais de 100 mil habitantes, é conhecida por abrigar a companhia de aviação SAAB. Ali, a maior parte dos serviços públicos é operada por uma única empresa estatal, a Tekniska Verken. A empresa, de propriedade do município, originariamente consistia numa empresa privada de eletricidade no final do século XIX. Ao longo do século XX, a empresa foi agregando mais e mais serviços. Atualmente, tem mais de 900 empregados e presta serviços de eletricidade, iluminação pública, água, esgotos, aquecimento, gestão de resíduos, biogás e biometano, internet e também consultoria energética.

Em 1954, surgiu o Sistema de aquecimento distrital da cidade. Em 1959, a empresa passou a responder pela coleta de resíduos sólidos. E apenas em 1982, começou a produzir calor em sua primeira planta de *Waste-to-Energy* em Gärstad. A partir de 1997, a empresa começou a distribuir frio (*District Cooling*) a partir dos resíduos. Em 2005, construiu uma grande e moderna planta de incineração; em 2016, ficou pronta a sua gêmea.

Juntas, as plantas de Gärstad têm capacidade de incinerar um total de 420 mil toneladas de resíduos separados o ano todo. Essas plantas operam na base enquanto as gerações de pico e reserva são cobertas por outras plantas menores, com diferentes capacidades e combustíveis.

O aquecimento distrital de Linköping é conectado com as redes de aquecimento distrital dos municípios de Mjölby, Ljungsbro e Lingham. A flexibilidade do Sistema permite que diferentes plantas e combustíveis sejam priorizados tanto para a geração de calor como de eletricidade, levando em conta o preço dos combustíveis, os impostos, as tarifas e outros fatores.

A planta de Gärstad consiste em cinco linhas de incineração. As caldeiras 1, 2, 3 (Panna 1-3) com um sistema de limpeza associados ficam no prédio velho. Já as modernas caldeiras 4 e 5 (Panna 4,5) ficam nos prédios modernos.

As caldeiras 1 a 3 são todas de água quente, sendo que a primeira (Panna 1) tem a capacidade de 15 MW, enquanto as caldeiras 2 e 3 têm, cada uma, potência de aproximadamente 30 MW. O vapor gerado nessas caldeiras produz tanto calor quanto eletricidade (10 MW) ou somente calor. A planta abriga também uma instalação adjacente a essas plantas para queimar óleo, abastecendo mais de 50MW de eletricidade.

A primeira das novas caldeiras (Panna 4) usa vapor para a geração simultânea de calor e eletricidade. A produção de eletricidade ocorre em uma turbina de pressão reversa. A caldeira tem uma potência de 68 MW, com subsequente condensação de gases e bombeamento de calor que podem ser recuperados. Para alcançar a máxima flexibilidade na otimização energética, há uma linha de vapor entre as diferentes caldeiras.

A caldeira Panna 5 tem a capacidade maior, de 84 MW. Com a condensação dos gases residuais, podem ser obtidos adicionais 12 MW. A energia gerada também é flexível e pode ser tanto usada diretamente na geração de calor, num condensador diretamente ligado à rede de aquecimento distrital, quanto pode gerar eletricidade numa turbina de pressão reversa de 21 MW.

Figura 29 – A planta de Gästads se divide em moderna e a antiga

Fonte: O autor (2017).

A alta capacidade energética, em especial das novas caldeiras, trouxe uma nova questão para a empresa: o melhor uso da energia. Uma vez que os resíduos precisam ser tratados o tempo todo, mas a necessidade de calor se dá principalmente no inverno, seria conveniente que parte da energia pudesse ser armazenada. A empresa está estudando alternativas para conseguir isso.

O monitoramento ambiental congrega não apenas as plantas de Gärtad, mas também as menores (que são usadas em momentos de pico ou necessidade de reserva), as plantas de Kraftvarme (na área central da cidade) e Tornby. Os dados de emissões são continuamente coletados por instrumentos de controle e processo. O conjunto de dados medidos em tempo real é transferido para o Excel, a partir do qual os relatórios internos e externos são construídos. Esses dados se consolidam num relatório diário que cobre o desempenho de hora em hora, reportando os níveis de compostos verificados e se atendem às condições exigidas pela autoridade.

As emissões são checadas todo o tempo nos monitores do controle central da planta. Se houver algum problema no equipamento de limpeza que cause a superação dos limites regulatórios, um relógio automático começa a informar os colaboradores do controle sobre quanto tempo a falha deverá persistir antes de a caldeira ser desligada.

Além das incineradoras, a empresa possui digestores anaeróbicos e é uma das pioneiras no uso desse combustível no transporte urbano. A primeira experiência na cidade ocorreu ainda em 1989, com biogás cru (sem purificação), e respondia a uma necessidade de reduzir a poluição recorrente. Em 1992, o biometano (purificado) foi testado; em 1996, a cidade começou a usar comercialmente o combustível. Em 1997, construiu a planta de biometano de Åby.

Em 2002, todos os ônibus a diesel da cidade foram convertidos em biometano. Já o uso de resíduos alimentares incrementou-se só em 2012, quando a cidade começou a separar resíduos orgânicos em sacos verdes separados por sistemas óticos. Os demais sacos seguem para a incineração.

A empresa, altamente horizontalizada, atua em diversos serviços e tem como estratégia acumular as operações para ganhar sinergia entre as áreas de operação. É uma estratégia que funciona bem na cidade, mas existem outras, como a encontrada em Helsingborg.

4.2.3 Helsingborg e as parcerias para a economia circular

Helsingborg, localizada na Província da Escânia no sul do país, é a oitava maior cidade do país com aproximadamente 130 mil habitantes, e separa-se da cidade dinamarquesa de Helsingor pelo canal de Öresund.

Quem opera resíduos na cidade é a empresa NSR (Nordvästra Skånes Renhållnings AB, ou Companhia de Saneamento do Noroeste da Escânia). Criada em 1982, é propriedade da cidade de Helsingborg em conjunto com cinco outras cidades da região: Bjuv, Båstad, Höganäs, Åstorp e Ängelholm.

Inicialmente, sua atividade congregava as atividades de coletar e separar resíduos, produzir biogás, gerenciar materiais recicláveis e reusáveis, mandar resíduos combustíveis para a incineração e aterrar outros materiais. Mas, ao longo do tempo, a empresa foi terceirizando muitas dessas funções, mantendo as companhias parceiras trabalhando de forma cooperativa. Como exemplo, a produção de biogás foi repassada para a empresa OX2. A empresa Envir era um departamento interno de análise, mas virou uma empresa privada independente.

Desse modo, pode expandir suas atividades, mas manter a sinergia com a NSR, que está sempre buscando parcerias. A planta de incineração Filbörnaverket, por exemplo, foi construída pela Öresundskraft no terreno da NSR e os resíduos não recicláveis que chegam da cidade vão para a incineradora. O grupo de empresas funciona como um *cluster* e busca trabalhar de forma colaborativa no projeto Vera Park.

Figura 30 – Vista Aérea de Filborna, onde a maioria das empresas de Vera Park se localiza

Fonte: Vera Park (2017).

Desse modo, cada empresa pode focar melhor em seu *core business*, sendo que o da NSR é a coleta e separação de materiais como papel, plástico e outros recicláveis. Uma vez que a empresa foca nas suas atividades principais, pode também apoiar as demais. Vera Park é o nome dessa iniciativa ousada liderada pela empresa para propiciar uma sinergia entre as participantes, no sentido de aumentar a eficiência das ações voltadas para uma economia circular.

O Vera Park congrega 14 empresas de tecnologias limpas da região. Além das empresas, há a colaboração com a Universidade de Lund, por meio do Departamento de Estudo e Gestão de Serviços, e com o próprio setor público. Trabalhando de forma conjunta, as empresas podem buscar novos mercados tanto na Suécia como no exterior. Além da já mencionada NSR, há as empresas: regional de energia Öresundskraft AB; internacional de energia OX2 Production AB; e Envir de caracterização de resíduos, que fazem parte do projeto; além das empresas: internacional de consultoria WSP; de coleta e reciclagem TMR; regional de logística Ohlssons AB; de recuperação de sucata, KAABS Nordic AB; de biomateriais e materiais biodegradáveis, GAIA Biomaterials; a líder nacional na gestão de resíduos e serviços ambientais, Ragn-Sells AB; OCO Nordic, que usa gelo seco para limpeza, controle de praga e outras funções; a empresa de purificação de biogás LBG AB; a de limpeza FEAB Partners AB; e a empresa de soluções em plástico para coleta de lixo e lixeiras. Algumas dessas empresas foram visitadas pelo pesquisador.

4.2.3.1 Öresundskraft

Öresundskraft é a empresa de energia líder da região, propriedade da prefeitura de Helsingborg e opera seis plantas em Helsingborg e quatro em Ängelholm. As mais importantes são Filbornaverket, Västhamnsverket e Åkerslund. Tais plantas abastecem Helsingborg com calor, frio e eletricidade. Filbornaverket é a maior planta de recuperação energética de resíduos e fica dentro do terreno da NSR. Em 2013, a planta começou a operar, depois de um investimento de 1,85 bilhões de coroas suecas, o maior investimento da empresa desde 1982. A planta é capaz de queimar aproximadamente 200 mil toneladas de resíduos por ano e o calor gerado abastece cerca de 40% das necessidades térmicas do *District Heating* da cidade de Helsingborg; além de produzir eletricidade para seis mil residências.

A caldeira da planta recebe resíduos (60% industrial e 40% de residências) durante todo o dia. Esses resíduos são separados, o que quer dizer que não são aceitos plásticos, metais, papéis de jornal, embalagens de papel, restos de comida e tudo o que pode ser reciclado. Além disso, não são aceitos resíduos perigosos.

O valor calorífico médio dos resíduos que chegam é 12MJ/kg, mas a planta tem a capacidade de receber material com o mínimo valor calorífico de 10MJ/kg. Eles têm uma quantidade de 30% de água e três toneladas de resíduos, o que substitui aproximadamente uma tonelada de óleo. Durante o verão, a planta opera o mínimo, uma vez que a base de aquecimento distrital é menor.

Figura 31 – A planta de Filbornaverket da Öresundskraft, localizada nas dependências da NSR

Fonte: O autor (2017).

A planta tem uma área de 900 m² de silo para receber os resíduos que consegue, média de 15 mil m³, o suficiente para a operação de um final de semana estendido em que não há entrega de combustível.

O combustível é levado ao funil da caldeira por dois guindastes desenhados para operarem de forma automática, sem operadores, um misturando os resíduos e o outro carregando o funil. Apesar de automáticos, os guindastes podem ser operados manualmente em caso de risco ou fogo. O estado do combustível é monitorado por uma câmera sensível ao calor capaz de detectar focos de fogo. Para evitar o mal cheiro, a caldeira retira o ar necessário para a combustão desse silo de recepção.

A quantidade de energia desejada é estabelecida pelos funcionários da estação de controle, cujos sistemas ajustam a quantidade de resíduos combustíveis que devem ser levados para a caldeira e a quantidade de ar para combustão que deve ser injetado na caldeira. A combustão é controlada para assegurar a temperatura de 850°C, por pelo menos dois segundos, e evitar o surgimento de dioxinas. Outro parâmetro é a quantidade de ar na caldeira, uma vez que o excesso reduz a eficiência e a falta aumenta a emissão de poluentes. Portanto, a quantidade de oxigênio é medida continuamente e controla a alimentação de combustível na caldeira.

A limpeza do gás começa imediatamente depois da queima, adicionando-se amônia ao gás para a redução de óxidos de nitrogênio. O gás residual entra no sistema de limpeza de gás a uma temperatura de 160°C e recebe uma quantidade de cal para disparar reações alcalinas com ácidos hidrolóricos, dióxidos de enxofre e fluoreto de hidrogênio no gás residual.

Utiliza-se carbono ativado para separar dioxinas e materiais pesados como mercúrio, cádmio e chumbo. Isso ocorre por adsorção e os contaminantes ficam aderidos à superfície do carvão. A mistura de compostos do efluente gasoso da combustão, adição de cal e carvão ativado é sugada e filtros retêm os contaminantes. O gesso e o cloreto de cálcio formados são automaticamente descarregados por ar comprimido e transportados para silos de resíduos. Algum carbonato de cálcio é reciclado no processo. Anualmente, cerca de sete mil toneladas dessa cinza volátil são levadas para a Noruega, onde há um aterro especial.

Essa fase seca de tratamento de gases já atenderia aos requisitos das autoridades, mas um tratamento úmido extra aumenta tanto o grau de purificação quanto a eficiência térmica. A fase úmida ocorre em *scrubber* que contém carvão ativado e não só purifica ainda mais o gás, mas também serve de reserva caso o filtro têxtil venha a falhar.

Restos de dioxinas e resíduos de amônia e metais pesados são capturados assim como residuais dióxidos de enxofre e ácido hidro clórico são eliminados com a adição de hidróxido de sódio. Além disso, o *scrubber* aumenta a eficiência térmica do processo, uma vez que, ao passar por ele, a temperatura dos efluentes gasosos decai de 140°C para aproximadamente 30°C e a transferência desse calor dá uma potência adicional de 16 MW em calor, contribuindo com a eficiência desse processo.

Aproximadamente 1/3 da água contida no lixo vai para a atmosfera pela chaminé e o restante é recuperado. Com relação à produção elétrica, a turbina de potência de 17MW é desenhada para suportar uma carga de 110%, continuamente, para lidar com as variações de vapor resultante da queima de resíduos.

No projeto de Filbornaverket, a infraestrutura de aquecimento distrital do município é importante, uma vez que a planta fica 47 metros acima do nível do mar e cerca de cinco quilômetros distante do centro da cidade. Uma estação de bombeamento em Österleden e aproximadamente 4,7 quilômetros de dutos com 700 mm tiveram de ser instalados, além de um tanque de armazenamento de 40 mil m³.

4.2.3.2 OX2

Se a incineradora recebe os resíduos não recicláveis, o biodigestor da OX2 recebe os resíduos alimentares separados. A planta em si é da NSR, mas desde primeiro de janeiro de 2016 foi terceirizada para a OX2, empresa de energia que opera principalmente fazendas eólicas. A entrada na operação da planta de biometano faz parte do plano de diversificação do seu portfólio, que contempla não apenas biogás, mas solar, geotérmica e armazenamento energético. A empresa já tinha experiência com biogás, mas oriundo de aterro, operando digestor anaeróbico essa planta de Helsingborg é a primeira.

A planta emprega 14 pessoas e processa aproximadamente 150 mil toneladas de resíduos orgânicos, separados em residências ou indústrias, e produz anualmente aproximadamente 80 GWh de biogás, substituindo cerca de oito milhões de litros de gasolina, e 120 mil toneladas de biofertilizante. O gás é purificado e usado nos ônibus da cidade (verdes), nos ônibus regionais (amarelos), caminhões de lixo e outros veículos. A frota inteira da cidade, operada pela empresa regional de transporte público, a Skånetrafik, é abastecida por biometano.

Figura 32 – Ônibus movido a biometano na cidade de Helsingborg

Fonte: O autor (2017).

A planta da OX2 produz biofertilizante líquido composto por nitrogênio, fósforo e potássio, com qualidade certificada pelo Instituto de Pesquisa Técnica Sueca. Uma vez ao mês, a empresa realiza a sua própria amostragem e análise para controle de qualidade, já que o instituto técnico o faz somente anualmente. Além do biodigestor, a empresa também extrai biogás do velho e já fechado aterro de Filborna, mas esse gás é utilizado para District Heating em uma planta de capacidade de 9 MW, que produz 12 GWh, o suficiente para aquecer cerca de mil residências anualmente.

4.2.3.3 TMR

Fundada em 2005, a empresa TMR oferece capacidade técnica para as empresas cumprirem a sua responsabilidade com relação aos resíduos. A empresa, privada e independente do interesse das indústrias e matérias-primas, atualmente possui um sistema de coleta e reciclagem que cobre todo o país.

O foco da empresa é montar um sistema eficiente que recicle todas as embalagens do país com um mínimo de transporte. Para tanto, a sua estratégia é baseada na parceria para encontrar materiais que devem ser recicláveis. Embora esteja empenhada e na vanguarda da busca por novas tecnologias para viabilizar a reciclagem dos materiais, a empresa reconhece que certas partes das embalagens, por exemplo, alguns tipos de plásticos, ainda não conseguem ser transformados em novos materiais, tendo de ser destinados à recuperação energética.

4.2.3.4 Envir

A Envir é uma empresa especializada na análise de composição dos resíduos sólidos urbanos. Até 2013, era um departamento da NSR, mas com a oportunidade de oferecer serviços para várias prefeituras que não estavam na área de concessão, a NSR decidiu terceirizar essa atividade, sendo que a antiga representante do departamento, é a executiva que agora conduz os negócios.

A empresa está crescendo e já atende 200 cidades. Esse crescimento é baseado na necessidade das prefeituras de estabelecerem planos de gerenciamento de resíduos que exigem caracterização. O plano dura cinco anos, mas a prefeitura precisa fazer análise anual para verificar o desempenho.

Normalmente, a empresa analisa lixo residual – que vai para as incineradoras – e resíduos alimentares – que podem abastecer digestores anaeróbicos. Se houver uma fração considerável de resíduos recicláveis nesses resíduos, a prefeitura age para melhorar a separação de resíduos nos municípios. A empresa faz entre 300 e 400 análises anualmente para municipalidades. Isso exigiu que a empresa buscasse dependências fora da NSR, atualmente próxima de Algelholm, mas ela ainda integra a Vera Park para aproveitar as sinergias.

Cada análise pega uma amostra de 500 kg de diferentes áreas. Normalmente, as prefeituras solicitam duas análises: uma de resíduos alimentares e outra de lixos residuais, o que transforma o montante numa tonelada. A empresa baseia o seu crescimento na legislação sueca e europeia e na percepção maior com relação a importância da análise de resíduos, no que tange à economia circular, por isso volta-se exclusivamente aos mercados europeus, mais especificamente os nórdicos.

4.2.3.5 FEAB Partners

FEAB é uma pequena companhia especializada em limpeza ambientalmente sustentável. A empresa começou limpando prédios (fachadas e pisos) e cresceu por causa da necessidade de limpeza de grafites e pichações. Mas o que a levou ao Vera Park foi a capacidade de limpeza das lixeiras, atividade iniciada em 2012.

Em 2014, a NSR pediu que a empresa desenvolvesse uma tecnologia de limpeza que usasse somente água em alta temperatura e pressão, sem produtos químicos. A empresa desenvolveu um caminhão de limpeza que limpa as lixeiras sem que necessitem estar vazias, uma vez que os sacos de lixo ficam armazenados no fundo do caminhão e a lixeira é limpada dentro dele caminhão, evitando perda de água.

Diariamente, cada caminhão consegue limpar entre 50 e 100 lixeiras (dependendo das distâncias), mas a empresa está trabalhando em melhorias para chegar à limpeza de 120 lixeiras ao dia. Em 2014, quando se mudou para as dependências da NSR, a empresa limpou 24 mil lixeiras; em 2015, 36 mil; em 2016, 40 mil. A previsão para 2017 era de 60 mil. Estar junto ao Vera Park tornou-se importante para a pequena empresa, pois pôde se especializar no serviço, ter mais percepção das tendências do mercado, além de conseguir apoio e reconhecimento.

4.2.3.6 iTunnes

A empresa iTunnes é focada em projetos de produtos que possam melhorar o armazenamento de resíduos. A empresa, por exemplo, desenhou quatro produtos para o consórcio do Vera Park: uma tampa de lixeira que afasta moscas e vermes, uma ferramenta de compressão de sacolas plásticas e uma fechadura de lixeira e está desenvolvendo um recipiente específico para resíduos orgânicos voltados à produção de biogás.

A pequena empresa foi convidada ao consórcio depois de apresentar produtos para a NSR. A estatal de resíduos convidou-a, inclusive, para ficar sediada dentro das dependências dela. Desse modo, apesar de estar sediada e ter uma relação muito próxima com a NSR, a empresa não tem exclusividade para atendê-la e pode prospectar e trabalhar com outros clientes.

4.2.3.7 Movimentação pela economia circular em Helsingborg

Não foi possível visitar ou entrevistar representantes de todas as empresas do consórcio, mas as acima listadas dão uma amostra de como funciona a estratégia da cidade de Helsingborg para melhor gerenciar os seus resíduos rumo à economia circular, o principal tema também da Conferência Opening the Bin, realizada em abril de 2017, no Campus de Helsingborg da Universidade de Lund.

Entretanto, na conferência, que teve palestrantes da Europa e América do Norte, a abordagem não foi técnica, e sim do ponto de vista das ciências humanas. Discutiu-se bastante a significação das palavras ligadas a resíduos e a termos como “reciclagem”, “reuso” e suas aplicações durante a história.

Figura 33 – Palestra inaugural da *Conferência Opening the Bin*

Fonte: O autor (2017).

A conferência, patrocinada pela NSR, mostrou como a cidade e a Universidade de Lund estão abrindo os horizontes na busca por uma economia circular mais abrangente, com soluções que extrapolem os aspectos técnicos e contemplem mais a hierarquia de resíduos.

4.2.4 Jonköping e o foco na energia térmica

Jönköping é uma cidade no centro-sul do país, situada às margens do lago Vener, com cerca de 95 mil habitantes. A empresa que cuida do Sistema de District Heating da cidade é a Jönköping Energi AB, propriedade da prefeitura. A empresa, que abastece a cidade desde o início da década de 1980, possuía apenas duas usinas de aquecimento distrital quando foi construída a moderna planta de Torsvik, em 2006. Uma usava gás de aterro e a outra (Munksjö), usava óleo e resíduos da indústria de papel, no centro da cidade, e datava já do fim da década de 1960, por isso a nova planta foi construída (SHERRARD, 2007).

Construída em 2006, a planta de Torsvik, situada na área de mesmo nome, fica a dez quilômetros de distância do centro, local onde a gigante de móveis sueca IKEA tem o principal ponto de distribuição. A planta tem autorização para queimar 200 mil toneladas de resíduos por ano. Em 2016, queimou aproximadamente 162 mil toneladas de resíduos, que geraram calor para cobrir a necessidade de 30 mil residências ou metade da demanda municipal de Jönköping e da vizinha Huskvarna, enquanto a eletricidade alimenta a rede.

Figura 34 – A planta de Torsvik da Jönköping Energi

Fonte: O autor (2017).

A planta possui duas linhas de produção, uma usa resíduos (KVVT1) e a outra biomassa (KVVT2) e ambas produzem tanto calor como eletricidade. A KVVT1 trata resíduos urbanos em uma caldeira de vapor de 60 MW (42bar, 380 ° C) equipada com um sistema de redução seletiva não catalítica e dois queimadores de apoio de 20 MW cada. O sistema de purificação consiste em um reator dessulfurizador, um filtro têxtil, duas etapas de scrubber e condensador de duas etapas, além de uma turbina de 16MW.

No processo, os resíduos, compostos basicamente por 40% de resíduos urbanos e 60% de resíduos industriais, com uma média de poder calorífico de 11,7 MJ/kg, depois de pesados e registrados, são depositados num silo, onde dois guindastes os misturam e colocam no funil que abastece a caldeira, sobre cuja grelha escorre os resíduos, que vão, com isso, secando, acendendo e queimando, chegando a temperatura de 1100°C. Os dois queimadores de apoio asseguram que a temperatura nunca seja menor que 850°C.

A primeira ação de tratamento dos gases efluentes ocorre na forma de injeção de amônia (*Selective Non-Catalytic Reduction* – SNCR) e tem o objetivo de reduzir os óxidos nitrosos. O calor gerado na queima aquece a água na caldeira, que é levada, na forma de vapor, para a turbina que gera eletricidade. Em seguida, o vapor quente passa por dois condensadores com água que retornou do sistema de *district heating* e volta a ficar na forma de líquida enquanto o calor é transferido para o sistema de aquecimento distrital. Além do sistema principal, há o aproveitamento do calor gerado pelo sistema de purificação e esfriamento dos gases efluentes, recuperando mais energia.

Esses gases efluentes, depois da caldeira, passam pelo reator de dessulfurização (*Novel Integrated Desulfurization* – NID), onde cal queimada e carvão ativado são adicionados para reduzir principalmente ácido clorídrico, dióxido de enxofre, dioxinas e mercúrio. Os gases seguem e passam por um filtro de partículas que separa e coleta uma mistura de cinzas voláteis e produtos das reações. Então, os gases entram na fase úmida e são lavados ao *scrubber*, onde compostos acidificantes e metais são lavados. Por fim, o gás purificado passa pelo condensador e segue para a chaminé de 120 m onde são medidas as emissões.

A água usada no tratamento dos gases efluentes também é tratada, primeiro em um tanque de amortização, depois num tanque de neutralização onde o pH é aumentado para 8-9. Subsequentemente, passa pelo segundo tanque de precipitação em que metais pesados são separados e, no terceiro, é separado sulfeto ferroso.

No misturador, são adicionados polímeros para criar flocos com os poluentes que depois são separados no separador. A água retorna ao processo de tratamento dos gases efluentes. Depois da sedimentação, a água chega a um filtro de areia e, finalmente, em um filtro de carbono ativado que atrai qualquer substância residual.

As partes não queimáveis (escória) no fim da grelha têm separada a sua fração ferrosa por atração magnética. As cinzas voláteis e partículas restantes de limpeza e manutenção do equipamento, além dos produtos derivados do tratamento dos gases, são armazenados em silos depois enviados para aterramento apropriado.

De acordo com o depoimento do operador chefe da planta, um dos problemas dela ocorre quando os fornecedores enviam resíduos com excesso de plástico, que, em excesso, diminui o tempo de vida dos equipamentos e aumenta os custos operacionais da planta. Para evitar o envio em excesso de plástico, especialmente o PVC, a companhia tem um rigoroso processo de controle de qualidade dos resíduos recebidos.

Por outro lado, a segunda linha (KVVT2) usa apenas biomassa para abastecer a sua caldeira de leito borbulhante (BFB) de capacidade total de 110 MW, equipado com reator de redução seletiva não catalítica (SNCR), queimador a óleo associado e turbina com potência de 35 MW.

As duas linhas compartilham infraestruturas como o acesso, a sala de controle, o sistema de tratamento de água, as *wetlands*, as estradas e o acumulador de calor de 6000 m³, para equalizar o calor enviado, um radiador de 40MW, os dutos de *District Heating* e o sistema de condensação anterior à chaminé. Ao lado da planta, há um terminal de separação operado pela empresa privada Selectiva, que recebe um amplo espectro de resíduos pós-consumo, tais como: vidro, sucatas metálicas, papelão. Já com relação ao biometano, a situação é diferente.

Em Jönköping, a separação na fonte vem sendo implementada e os restos alimentares segregados são separados dos outros resíduos combustíveis para serem convertidos em biogás e biofertilizante.

Contudo, em abril de 2017, o conselho da cidade decidiu encerrar a produção de biometano, que se iniciava em Torsvik e terminava em Simsholmen, para verificar a possibilidade de cooperação regional para obter uma nova forma de produção ou ver se uma terceira parte se interessaria em operar o negócio em Jönköping (JONKÖPING POSTEN, 2017).

Entre as razões para o encerramento estavam as condições do mercado e também a dificuldade logística de operar em três locais diferentes (Hult, Torsvik e Simsholmen). Porém, a iniciativa causou reações. Agora os conselheiros buscam opções.

4.3 AS CIDADES PEQUENAS E SOLUÇÕES PARA ESCALAS REDUZIDAS

A questão da escala é essencial para viabilizar a economicidade das soluções de resíduos, especialmente das plantas de recuperação energética, consideradas caras. No Brasil, até as soluções mais baratas, como o próprio aterro, têm na escala um dos seus principais desafios. Por isso, três cidades pequenas foram trabalhadas nesse estudo. A diferença de tamanho entre elas, entretanto é significativa.

Borås poderia ser considerada uma cidade média para os padrões suecos (mais de 60 mil habitantes) e possui toda a estrutura das demais cidades médias. As cidades de Kristianstad (40 mil habitantes), Karlskoga, (27 mil) e, principalmente a cidade de Kil (12 mil), estabeleceram estratégias específicas para aproveitar a energia recuperada de resíduos considerando a sua baixa escala.

4.3.1 Borås: energia de resíduos no antigo polo têxtil

Borås é uma cidade próxima a Gotemburgo, fundada em 1621, e abriga aproximadamente 80 mil habitantes (é a 13ª maior cidade da Suécia) e mais de 11.500 empresas. É bem conhecida por sua indústria têxtil. Os serviços de energia na cidade começaram no final do século XIX, em 1894. O conselho da cidade tomou a decisão de construir uma térmica a vapor e, no mesmo ano, a primeira luz elétrica foi acesa na cidade. Telégrafos e iluminação foram os primeiros usos da eletricidade.

O surgimento da tecnologia de transmissão de longa distância ajudou a cidade a aproveitar as quedas d'água de Häggårda, Hulta, Haby e Axelfors para obter grande quantidade de energia disponível. Durante muitos anos, a cidade foi a maior consumidora per capita de eletricidade da Suécia. Quando as máquinas elétricas se tornaram o padrão da indústria têxteis, a cidade estava pronta para receber inúmeras fábricas desse tipo (BORÅS ENERGI OCH MILJÖ, 2011).

Uma vez que a principal demanda na cidade sueca é também o calor, constatou-se que se precisava de energia térmica para suplementar a elétrica. Em 1958, foi inaugurada a primeira usina térmica que foi conectada ao Sistema de *District Heating* no ano seguinte. A usina funcionava a óleo, mas dez anos depois passaria a usar resíduos também (BORÅS ENERGI OCH MILJÖ, 2012).

Em 1965, começaria a ser construída a principal usina de *District Heating*. Até hoje, a Ryaverket, que fica próxima do centro, tem sido modificada ao longo dos anos para tornar a sua produção cada vez mais limpa e eficiente. No começo, a produção, basicamente a partir de petróleo, queimava apenas uma pequena fração de resíduos.

Figura 35 – A planta de Ryaverket que fica próxima da cidade

Fonte: O autor (2017).

Duas caldeiras de resíduos foram inauguradas em 1966, e uma terceira, em 1972. Em 1987, as duas primeiras foram fechadas, seguindo a diretriz do Conselho Nacional de Geração de Energia Elétrica. A terceira caldeira continuou a ser operada até 1991, quando foi fechada. Na década de 1970, durante a crise do petróleo, a cidade começou a converter as usinas que usavam petróleo.

A partir de 1979, começaram a converter a caldeira para carvão ou lascas de madeira. Em 1984, duas grandes caldeiras de Ryaverket foram convertidas para queimar, combinando, biocombustível (75%) e carvão, (25%). Em 1994, um secador foi instalado para permitir que as caldeiras operassem com apenas biocombustíveis. O próximo passo seria a construção de uma planta de gaseificação, mas o projeto não prosseguiu.

Depois da proibição de aterramento de resíduos combustíveis na Suécia, a cidade de Borås decidiu construir uma planta moderna no mesmo local da anterior. Ryaverket tem agora uma planta de cogeração com duas caldeiras de biocombustíveis, duas de resíduos e duas turbinas geradoras. Há também um sistema de reserva com aquecedor elétrico e duas caldeiras *flex*, que podem operar com LPG/biocombustíveis/óleo. As caldeiras a biocombustíveis operam prioritariamente com *pellets* ou lascas de madeira de restos da indústria florestal. Os gases efluentes são depurados por filtros elétricos conectados a cada caldeira. Cinzas dessas caldeiras são usadas como fertilizantes de florestas.

Por seu lado, inauguradas em 2004, as caldeiras de resíduos são de leito fluidizado de 20 MW cada e têm capacidade total de 40 MW e moderna tecnologia de limpeza de gás. Elas queimam a fração combustível dos resíduos sólidos urbanos (sacolas brancas), separada e pré-tratada na planta de Sobacken, que se localiza cerca de dez quilômetros do centro da cidade.

Depois de separados e pré-tratados em Sobacken, os resíduos voltam para Ryaverket onde a sua energia é extraída e transformada em calor, eletricidade e frio. Apesar de próximo à cidade, não há registros de queixas dos moradores, segundo depoimento do professor Richards (2017), da Hogskolan i Borås. Para assegurar a completa incineração e consequente baixa emissão, as caldeiras têm queimadores auxiliares para a ignição.

O sistema de limpeza de gases reúne cal e carvão ativado. Depois, os particulados são coletados em um filtro têxtil antes de passar para a chaminé. Metais são recuperados das cinzas e usados como material de construção.

Para assegurar o suprimento de energia na rede de *District Heating*, há seis pequenas plantas de reserva localizadas ao longo da rede, o que inclui duas localizadas em Ryaverket mesmo. Ambas operam com LPG, mas em 2007, uma foi convertida para bio-óleo. As demais que operam com combustíveis fósseis funcionam apenas em momentos muito frios ou em paradas de manutenção da Ryaverket (BEM, 2012).

O aquecimento distrital é distribuído, via dutos subterrâneos, para residências e empresas da cidade e usado parte em radiadores, parte para aquecer água das torneiras. Uma vez que as necessidades de calor variam ao longo do dia (normalmente a necessidade de calor é maior na manhã, quando muita gente quer tomar banho, e menor durante o dia, quando estão trabalhando), o acumulador, construído em 2010, que trabalha como um amortecedor, é usado para atender a demanda da manhã, sem uma queima adicional, reduzindo a necessidade de combustível.

Como sistema auxiliar, ainda há a bomba de aquecimento que retira calor da água de esgotos na estação de tratamento de esgoto. A atual matriz de combustíveis para *District Heating* na cidade é composta da seguinte forma: 26% de resíduos (na base); 50,7% de biocombustível; 2,6% de bio-óleo; 1,9% de calor residual; 7,3% de petróleo; 1,3% de eletricidade; e 1,0% de calor recuperado.

Em 1996, foi instalada também a rede de *District Cooling* grid para prover os consumidores com uma alternativa ao ar condicionado e à refrigeração. Esse frio abastece indústrias, escritórios, shopping centers e é produzido a partir do excesso de calor das caldeiras de resíduos, através de *chillers* de absorção. A empresa produz mais de 7,5 GWh de frio, principalmente em Ryaverket.

Há dois *chillers* de absorção movidos pela água do *District Heating*, em vez da eletricidade. A água salgada é usada para transferir calor entre os diferentes meios. Apenas uma pequena fração de eletricidade é necessária para o bombeamento e ventilação. Por outro lado, a eletricidade é complementada por quatro diferentes hidrelétricas. E tanto a geração dessas hidrelétricas como a gerada em Ryaverket são vendidas no mercado para a Nasdaq OMX Commodities (antiga Nord Pol), o mercado nórdico de eletricidade.

4.3.1.1 Outras destinações dos resíduos sólidos em Borås

Somente em 2006 é que a empresa Borås Energi och Miljö (BEM) foi formada pela prefeitura para cuidar, de forma integrada, dos serviços de aquecimento, produção de eletricidade, esgoto e gestão de resíduos sólidos da cidade. Com relação à estratégia para os resíduos, a empresa trabalha com um modelo que consiste em vários processos nas cadeias de reciclagem e também na transformação dos resíduos em energia via biogás, ou incineração, gerando calor, frio ou eletricidade.

Os habitantes de Borås separam os seus resíduos domésticos em diferentes sacos plásticos coloridos: brancos para resíduos combustíveis e pretos para resíduos orgânicos biodegradáveis. Os recicláveis são separados e depositados numa das oitenta estações de reciclagem da cidade (para embalagens e papéis) ou num dos cinco centros de reciclagem da cidade (onde podem ser entregues substâncias perigosas, entulho, resíduos verdes de jardinagem ou recicláveis).

Figura 36 – Um dos centros de Reciclagem da cidade de Borås

Fonte: O autor (2017).

Os sacos coloridos são levados para a grande estação de tratamento de Sobacken, onde são separados por leitura ótica; os pretos ficam na própria estação onde há um digestor anaeróbico; e os brancos são encaminhados para pré-tratamento dos resíduos combustíveis na própria planta e, posteriormente, retornam à cidade para serem queimados na usina de Ryaverket.

Figura 37 – Leitores ópticos para separar os sacos plásticos

Fonte: O autor (2017).

4.3.1.2 Biogás e biometano

A geração de biogás e biometano em Borås segue o padrão das outras cidades suecas, a começar pelas plantas de digestão anaeróbica em estações de tratamento de esgotos. Em 1934, a primeira delas iniciou os trabalhos, ainda na planta ativa de Gässlösa, e usava limpeza mecânica com câmaras de digestão para tratamento do lodo. Em 1939, a planta recebeu uma seção biológica com dois filtros percoladores (BORÅS..., 2011).

Toda a evolução da digestão anaeróbica da cidade se deu na tradicional estação de tratamento de Gässlösa, incluindo o início do aproveitamento de biogás e a primeira de abastecimento de biometano para transporte, inaugurada em 2003. Nesse mesmo ano, houve várias melhorias na produção de biometano, como a instalação de trocadores de calor para substituir o sistema mesofílico a 35°C pelo termofílico a 55°C, para aumentar a fração de transformação do material orgânico em metano.

Além disso, é claro, instalou-se a planta de purificação do metano que elevava a quantidade de 65% para 98%, viabilizando o uso do gás em veículos. Apesar de ter aumentado ao longo do tempo, a planta tem a sua capacidade de tratamento limitada a 5.400 m³ por hora. Uma vez que a cidade cresceu, nova Estação de Tratamento de Esgotos foi construída em Sobacken já com dois digestores anaeróbicos, o primeiro instalado em 1995 e o outro, em 2005.

A partir de 2008, as estações de abastecimento de veículos com biometano foram se sucedendo, com a estação da garagem de ônibus e a segunda estação pública, em 2009, e a terceira de Hulta, em 2010. Na moderna estação de tratamento de Sobacken, a geração de biometano é reforçada por: resíduos alimentares separados na fonte em sacos plásticos pretos que, identificados por leitores ópticos, são encaminhados para a produção de biometano; e resíduos orgânicos de fonte industrial.

Figura 38 – Planta de Biometano na estação de tratamento de Sobacken

Fonte: O autor (2017).

No final de 2010, 85% dos resíduos domésticos já eram coletados por caminhões rodando a biogás. Na época, a maioria dos ônibus urbanos já rodava com o biogás gerados nas plantas da cidade. Contudo, recentemente a empresa produtora perdeu uma concorrência e a operadora de ônibus usará biometano de outra origem.

Subproduto da produção de biogás, o lodo da digestão é misturado com resíduos de jardinagem e esterco para produzir fertilizante de jardins. Entretanto, o uso desse material na agricultura foi prejudicado pelo tratamento de esgotos da planta de Sobacken, porque o chorume do antigo aterro é tratado na estação de tratamento de esgotos. Desse aterro, a empresa também extrai uma pequena quantidade de biogás, usada internamente na planta.

4.3.2 Kristianstad tratando resíduos alimentares de Malmö

Se Malmö produz somente aquecimento, eletricidade e frio a partir de resíduos, por sua vez, Kristianstad, pequena cidade com aproximadamente 35 mil habitantes, que se especializou no biogás e biometano, e chama a si mesma de “A cidade do biogás”. Distante 90 quilômetros da maior cidade do sul da Suécia, recebe todo o resíduo alimentar pré-tratado de Malmö. A cidade, que começou a trabalhar com isso na década de 1990, tem uma localização privilegiada para produzir biogás, uma vez que fica próxima da principal região produtora de alimentos, o que possibilitou condições ótimas para aproveitar esses resíduos.

A planta de Karpalund é operada pela C4 Energi, um grupo da prefeitura Kristianstad. O grupo tem três empresas que entregam serviços públicos como eletricidade, aquecimento e refrigeração, redes ópticas, biogás e biofertilizantes. A planta Karpalund, construída em 1996, trata cerca de 103 mil toneladas de resíduos orgânicos todo ano, recebendo estrume, resíduos orgânicos industriais de empresas da região e resíduos orgânicos urbanos. O substrato tem a seguinte composição: de 30-40% resíduos orgânicos urbanos oriundos de Malmö, 20-30% estrume de fazendas da região, 20% de matadouros e o restante de indústrias de alimento da região.

A produção total anual é de mais de 50 GWh de biometano, sendo 85% do biometano transformado em combustível veicular e o restante enviado a termelétricas. Além do biometano, a planta produz biofertilizantes que são entregues em fazendas localizadas a menos de 30 km de distância. Segundo representante da empresa, o maior desafio é o plástico (não apenas os restos de plásticos que embalam os resíduos), e sim o microplástico contido em alguns produtos, como nos sabonetes líquidos.

Em 1999, a prefeitura de Kristianstad decidiu se tornar livre de combustíveis fósseis. O biometano faz parte dessa estratégia, uma vez que a emissão por veículos representava 50% das emissões totais. Atualmente, a cidade é autossuficiente em biometano e exporta o combustível para várias cidades da região.

Devido a importância do biometano para a cidade, há esforço integrado para desenvolver muito mais a indústria, por parte da prefeitura e da Universidade de Kristianstad e a Krinova Science Park (o centro de desenvolvimento de inovações envolvendo as atividades rurais, academia e empresas).

4.3.3 Karlskoga e a prestação de serviços de tratamento de resíduos para a região

Karlskoga é uma pequena cidade da província de Örebro com aproximadamente 30 mil habitantes. Sua economia tradicionalmente se baseava em ferro e armas. No fim do século XIX, essas armas se tornaram canhões e indústria de artilharia. Alfred Nobel teve um papel chave nessa transformação, que abriu uma das mais importantes indústrias do setor Bofors e a dirigiu de 1894 até a sua morte, em dezembro de 1896.

Ao longo do tempo, a estratégia foi se transformando. A cidade, que fica entre duas outras bem maiores, Örebro (cerca de 140 mil habitantes) e Karlstad (90 mil habitantes), agora estabeleceu uma estratégia para atender aos serviços públicos de resíduos e energia dessas duas.

O grupo de serviços públicos Karlskoga Energy & Environment Group, propriedade da prefeitura da cidade, é formado por oito empresas total ou parcialmente controladas pela holding. As cinco totalmente controladas: são Karlskoga Elnät AB (empresa de mercado de comercialização de energia), Karlskoga Kraftvärmeverk AB (produz e abastece de calor, vapor e eletricidade e é responsável pela planta de recuperação energética Mosserud), a VA Company in Karlskoga AB (produz água potável e trata esgotos), a Karlskoga Stadsnät AB (oferece serviços de rede de internet) e a Karlskoga Vattenkraft AB (opera 24 hidrelétricas de pequena escala em Timsälven e Svartälven).

Além disso, há as sociedades como: empresa de limpeza Mellansverige AB (91% da Karlskoga Energi & Miljö AB e outros 9% propriedade da prefeitura de Storfors); empresa de biogás Mellansverige AB (50% da Karlskoga Energi & Miljö AB e 50% da KumBro AB – uma empresa montada pelas prefeituras de Kumla e Örebro). No total, o grupo emprega 180 pessoas e fatura aproximadamente SEK 500 milhões de coroas suecas.

Karlskoga Kraftvärmeverk AB, que opera a planta de recuperação energética e está localizada na área industrial de Björkborn, produz e abastece o aquecimento distrital de residências e empresas em Karlskoga; abastece de vapor a área industrial de Björkborn; além de operar um centro de reciclagem na região de Mosserud.

Desde o fim dos anos 1970, o serviço de aquecimento distrital é oferecido, a partir de pequenas caldeiras, em várias localidades da cidade. A planta de Kraftvärmeverk em Björkborn foi construída em 1985. Nessa planta, que abastece 360 GWh de energia por ano, trabalham 50 pessoas. Em função de a cidade ter pouca densidade populacional, o sistema de *District Heating* tem 108 quilômetros.

Figura 39 – Planta de Kraftvärmeverk em Björkborn

Fonte: O autor (2017).

A planta da Karlskoga Kraftvärmeverk trata anualmente aproximadamente 100 mil toneladas de resíduos de 14 municípios da região, dos quais 60% é resíduo industrial e outros 40% resíduos sólidos urbanos. A incineração de resíduos não tratados de residências ocorre nas caldeiras de torrefação e dos resíduos pré-tratados é feito na caldeira de leito fluidizado (CFB). E o controle de qualidade dos resíduos é igualmente importante para os processos de combustão.

Apesar de as condições de otimização da combustão e controle da qualidade dos resíduos combustíveis serem essenciais para a redução das emissões de poluentes, a planta de Karlskoga utiliza tecnologias de ponta para a purificação dos efluentes gasosos. A planta usa purificação para tratamento em fase seca e fase úmida, sendo que calor adicional é obtido a partir do tratamento da fase úmida, no processo de condensação.

A água usada nessa fase é purificada antes de ir para a planta de tratamento. Depois da incineração, a parte não combustível, como os metais, compõe a escória, que representa cerca de 20% do peso original dos resíduos, já as cinzas volantes, recuperadas dos processos de purificação dos efluentes gasoso, representam de 3 a 5%.

4.3.3.1 Reciclagem e biometano

Para reduzir a quantidade de escória, a separação na fonte precisa ser melhorada. Por isso, a empresa possui um centro de reciclagem na região de Mosserud que recebe resíduos de empresas e indivíduos, que podem entregar resíduos perigosos sem que sejam cobrados por isso.

No que diz respeito à reciclagem biológica, outra empresa, a Mellansverige AB, parceira dos municípios de Karlskoga, Örebro and Kumla, opera uma planta de digestão anaeróbica na mesma região de Mosserud. Além de resíduos alimentares, são digeridos estrume e resíduos de agricultura. Esses substratos são pré-tratados num processo de pasteurização realizado em lotes a 70° por uma hora antes da digestão. Depois, o substrato é circulado em trocadores de calor e então é bombeado para os digestores.

Nos dois digestores, de capacidade de 6 mil m³, o substrato orgânico é convertido em metano por diferentes bactérias anaeróbicas. Então, o biogás bruto é purificado para biometano, classificado como combustível veicular. Este é comprimido para 250 bar e levado em containers para os postos de abastecimento.

A planta produz 48 GWh de biometano para veículos por ano, que são distribuídos em estações de abastecimento em Karlskoga e Kumla. O lodo do subproduto no processo é aprovado para fertilizar as plantações de alimentos.

4.3.4 Kil e a competitividade do *District Heating*

A menor infraestrutura de recuperação energética de resíduos visitada por essa pesquisa foi no município de Kil, pequena cidade da província de Värmland, que tinha 12 mil habitantes em 2010. Além de pequena, a cidade é pouco densa, tornando ainda menos atrativa economicamente a estrutura de aquecimento distrital. Por isso, a empresa Kils Energi, de propriedade do município de Kil tem uma estrutura bastante enxuta com apenas oito empregados.

A empresa, que atualmente produz 40 GWh ao ano e abastece cerca de 620 clientes, começou a operar em 1983. As primeiras caldeiras de Dalliden, instaladas no mesmo ano e de Karlslund, instalada em 1995, eram pequenas (1.6 MW e 1 MW respectivamente) até para o município e, a princípio, operavam a óleo, embora posteriormente tenham sido convertidas para usar *pellets* de madeira.

A planta que viabilizou o sistema de *District Heating* é a Lersätters, que tem potência de 9 MW e processa 15 mil toneladas de resíduos de madeira em lascas. Ela foi instalada em 2003, com uma tecnologia de combustão de leito fluidizado borbulhante (BFB), limpeza de gases seca com redução seletiva não catalítica, SNCR, sistemas de controle e uma estrutura similar às grandes empresas de recuperação energética.

A planta tem, inclusive, permissão para tratar resíduos sólidos urbanos. Porém, segundo o seu representante, essa atividade aumentaria em muito os custos operacionais da empresa e tornariam a atividade antieconômica. Por isso, a escolha foi por queimar apenas resíduos de madeira, focando esforços em contratos favoráveis de longo prazo.

Figura 40 – Planta Lersätters do município de Kil

Fonte: O autor (2017).

O controle dos custos é importante para uma empresa que, nessa escala e densidade, compete de forma desfavorável às iniciativas individuais de instalação de bombas de calor (*heat pump*), que usam energia elétrica. Por isso, todo o esforço na manutenção da equipe enxuta, no alto nível de automação e na redução dos custos operacionais. Contudo, um dos diferenciais da empresa, com relação ao concorrente *heat pump*, está no atendimento de manutenção.

Figura 41 – *District Heating* em Kil

Fonte: Kils Energi (2017).

4.4 ASPECTOS PRINCIPAIS DO CAPÍTULO 4

As prefeituras são os principais agentes do avanço da gestão de resíduos e recuperação energética dos mesmos na Suécia. Com a maior fatia dos impostos (incluindo o de renda), o município tem ampla capacidade e independência de ação. O governo central apenas estabelece as metas e diretrizes gerais que os municípios têm de atender. A partir daí as prefeituras tem autonomia para suas ações. E elas o fazem de formas bastante diferentes umas das outras, embora haja muita cooperação entre elas, especialmente nas cidades próximas.

No caso de Estocolmo, fica clara essa colaboração entre os municípios que compõem a Grande Estocolmo, pois foram ligando tanto os seus sistemas de *District Heating* como os sistemas de gerenciamento de resíduos; além de grande participação de empresas privadas que, por sua vez, também trabalham colaborativamente com estatais dos municípios.

A segunda maior cidade do país, Gotemburgo, por sua vez, busca protagonismo na representação da sustentabilidade, mas com menos participação privada. Ela se utiliza de um modelo bastante comum na Suécia, que consiste em montar empresas, cuja propriedade é de um conjunto de municípios, dar a elas independência operacional para que não se sujeitem a interferências políticas diretas.

Assim, por exemplo, é a Renova, que opera a gestão de resíduos e sistema de aquecimento nas cidades proprietárias. Não obstante, ainda há reclamação com relação a certa interferência política, como no caso do Conselho da estatal (propriedade do município) Göteborg Energi, que decidiu não prosseguir com o projeto Gobigas (de gás sintético renovável), embora a decisão tivesse basicamente cunho econômico.

O modelo de empresas de propriedade de vários municípios também é seguido pela terceira maior cidade do país, Malmö. A empresa Sysav cuida dos resíduos de 14 municípios do extremo sul do país, além de fornecer aquecimento. Por questões econômicas, a empresa resolveu não apostar na geração de biogás, apenas pré-trata resíduos alimentares separados para entregar em Kristianstad, cerca de 90 km distante.

Todavia, grande parte das cidades médias oferece serviços completos, a despeito da menor escala. A cidade de Västerås ainda separa as duas áreas de atuação: o aproveitamento dos resíduos combustíveis, aquecimento e fornecimento de eletricidade distrital, a cidade conta com a estatal da cidade Mälarenergi. Para a geração de biometano, existe a VafabMiljö, propriedade dos municípios de toda a Província de Västmanland.

Em Linköping, a estatal municipal Tekniska Verken opera as duas rotas e ainda uma série de serviços públicos como tratamento de esgotos e rede óptica.

Em contraposição a essa estratégia, a operadora de resíduos de Helsingborg articula parcerias com outras empresas, tendo maior sinergia por economia circular. Assim, busca abrigar em sua sede (embora também faça parcerias fora dela) empresas de reciclagem e de recuperação energética. Nela estão, por exemplo, a Öresundskraft, que fornece calor e eletricidade para o município, e a O2X, empresa privada focada em energias renováveis, que opera a planta de biometano.

Em Jönköping, apesar de a planta de recuperação energética por incineração ser nova e moderna, desativou-se a rota de biometano.

A estratégia se faz mais necessária ainda para os pequenos municípios. Borås, um polo têxtil, ainda tem uma escala suficiente (80 mil habitantes) para manter uma empresa (BEM) para todos os serviços e aproveitar a energia de resíduos tanto na rota da biodigestão quanto da incineração.

Karlskoga, por sua vez, precisa de resíduos das vizinhas (bem maiores) Karlstad e Örebro, para suprir as suas plantas (em especial a de biometano). O mesmo ocorre com Kristianstad, que recolhe resíduos orgânicos pré-tratados de Malmö para operar sua planta de biometano. Kil, a menor de todas, tem uma planta incineradora de resíduos, mas para manter a competitividade do seu principal negócio, aquecimento, prefere usar resíduos de madeira em sua pequena caldeira.

A estratégia de Kil, bem como a preocupação da planta de Jönköping com o excesso de plástico, derrubam um dos mitos de que as plantas de recuperação energética precisam do poder calorífico do plástico, por isso competem com a reciclagem. Como é sabido, vidros e metais não são combustíveis, por isso as incineradoras têm muito interesse em separá-los antes. E restaria o plástico e o papel entre os materiais usualmente considerados recicláveis.

Os depoimentos de Kil e Jönköping foram esclarecedores para mostrar que o plástico incorre em custos operacionais adicionais para as incineradoras. Já o papel passível de reciclagem precisa de características específicas, o que é feito com sucesso sob o regime de responsabilidade dos produtores, pois revistas e jornais têm um sistema próprio.

Por sinal, embora todas as cidades tenham estratégias para a reciclagem, uma parte importante fica com o chamado regime do produtor que monta, com a colaboração das cidades, toda uma cadeia de logística reversa institucionalizada. Além dos pontos de recepção públicos, cada supermercado tem um ponto de recepção que emite um voucher de SEK 1,00 que pode ser descontado na compra. Geralmente, é nesses pontos que os “catadores” suecos (existem poucos, mas existem) vão trocar resíduos por alimentos.

Além disso, há a coleta de recicláveis de porta a porta, que cada município organiza de uma forma. Uns coletam separadamente; outros disponibilizam sacos plásticos de cores diferentes para a separação posterior. Algumas cidades exigem separações diferentes, por exemplo, separar vidros coloridos dos claros. Enfim, cada cidade traça a sua estratégia, mas o avanço é um traço comum a todos os municípios e caracteriza tanto a melhora contínua na gestão de resíduos como um progresso na descarbonização da economia em todo o país.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados das visitas técnicas realizadas na Suécia encontram-se sintetizadas e discutidas neste capítulo. Elas se constituíram não apenas uma fonte primária de informações que pode ser útil para interessados no assunto, mas, principalmente, oferecem uma visão baseada na realidade cotidiana do processo de como a Suécia alcançou o seu feito de conciliar redução de emissões, minimização de aterramento, e promoção do crescimento econômico.

De 1990 a 2016, como visto anteriormente, a Suécia reduziu em 26% as emissões e cresceu economicamente 75%, evidenciando um descasamento entre os dois aspectos, que ainda evoluem de forma similar na maioria dos países. No mesmo período, o país saiu de um aterramento de cerca de 40% dos resíduos para aterrar menos de 1%, mostrando um indiscutível avanço em ambos os aspectos.

Ao vivenciar a realidade do setor, foi possível tirar algumas lições que podem inspirar tomadores de decisão no Brasil. A principal lição das iniciativas suecas é a importância da percepção integrada dos dois componentes ambientais que, se concebidos de forma isolada, encontram soluções economicamente mais vantajosas. Porém, se entendidos conjuntamente abrem possibilidade para mecanismos globalmente mais racionais.

Com relação ao RSU, por exemplo, o aterramento é a alternativa mais barata (depois da disposição irregular, inaceitável de todo). Porém, os resíduos podem ter destinação muito mais nobre. Podem e devem prioritariamente ser reciclados, economizando energia e materiais em seus respectivos ciclos de vida. E também a sua fração orgânica pode, via digestão anaeróbica, gerar energia na forma de biogás, o qual, por sua vez, pode ser convertido em biometano (próprio para o uso em motores), gerando como subprodutos biofertilizantes que recuperam nutrientes essenciais para a agricultura. Os resíduos combustíveis podem, via incineração direta (*mass burning*) ou pré-tratados, em leitos fluidizados ter uma parte de sua energia recuperada. Apesar de mais caras, essas soluções, considerando-se uma visão integrada, são muito mais vantajosas.

Na energia ocorre o mesmo. Mesmo com soluções mais econômicas, cadeias de valor estabelecidas, tanto para o uso em veículos quanto para a geração firme (de eletricidade), as mais usadas se baseiam em combustíveis fósseis. No caso do uso em transporte, por exemplo, o uso de derivados do petróleo é reinante.

O hidrocarboneto, entretanto, que foi a marca da mobilidade do século XX, é fóssil e um dos principais responsáveis pelo aumento das emissões de gases efeito estufa. Por isso, apesar de ser mais econômico no curto prazo, causa imensos prejuízos socioeconômicos no futuro. Para a geração de energia elétrica firme (não intermitente), ainda se usa muito carvão, óleo e gás natural. Apesar de serem soluções mais baratas, se considerado todo o impacto e a visão de longo prazo, tornam-se muito mais custosas do que o aproveitamento dos resíduos.

Na maioria dos países (não é privilégio exclusivo do Brasil), os setores de gerenciamento de resíduos e geração de energia são vistos de forma isolada e buscam, cada qual, suas soluções mais econômicas. Ao apresentar um exemplo de abordagem integrada, como o do caso sueco, esta tese torna evidente que soluções mais vantajosas economicamente para cada setor nem sempre proporcionam vantagens para a sociedade em geral, especialmente considerando-se as limitações ambientais do planeta.

Por isso as soluções regulatórias visam penalizar as soluções com altos custos para a sociedade, como os impostos sobre emissões e aterramento, e premiar soluções que reduzam esse custo (financiamento, apoio estatal). É o que os economistas chamam de internalização das externalidades.

Essas soluções regulatórias são importantes para dar sustentabilidade às iniciativas, de modo a manter um compromisso com a economicidade das soluções. Embora a maior parte das plantas seja estatal, os cuidados relativos à viabilidade econômica estão presentes todo o tempo, seja na hesitação da Sysav de Malmö em construir a sua planta de biometano, seja na preocupação da Jönköping Energi com o excesso de plástico que aumenta o seu custo operacional, seja na utilização apenas de resíduos de madeira na planta de Kil para minimizar esses custos operacionais.

Daí também se tira outra lição, a de que o aproveitamento energético de resíduos não compete com a reciclagem, pelo menos no estado atual do desenvolvimento tecnológico. Não é à toa que os países que mais reciclam também são aqueles que aproveitam a energia do material não reciclável. Dentre os materiais com a cadeia mais consolidada, já era sabido que vidros e metais não são combustíveis nem biodigeríveis, portanto precisam ser separados e evitados nas incineradoras e nos digestores anaeróbicos.

Ao obter depoimento de gestores das plantas, especialmente de Jönköping, Södertälje e Kil, pôde-se aprender que plástico aumenta o custo operacional delas, portanto é evitado (pelo menos em excesso) nas plantas incineradoras e nos biodigestores anaeróbicos. Nestes últimos, os microplásticos contidos em produtos de higiene pessoal são os principais problemas, segundo depoimento obtido em Kristianstad.

Resta apenas o papel, que precisa de condições específicas para que sua reciclagem seja economicamente viável no estágio tecnológico atual. Por isso, uma das primeiras cadeias de reciclagem no sistema de responsabilidade do produtor implantada na Suécia foi a de jornais e revistas, cujo estado do papel residual atende condições específicas dessa modalidade de reciclagem.

O sistema de responsabilidade do produtor da Suécia tem uma grande aliada: a grande percepção social sobre a questão ambiental, principalmente no que tange à questão climática. Por isso, os pontos de entrega são realmente frequentados e as entregas efetivadas. Nesse sentido, há uma coesão entre o Estado e a sociedade em busca de melhores soluções que contemplem a mitigação dos impactos climáticos e ambientais. Mas há também uma confiança mútua entre os atores.

Ainda no século passado, quando se levantou a preocupação com emissões de poluentes locais como dioxinas e furanos a partir da queima de resíduos, essa confiança mútua ficou evidente. Para se ter a noção da importância do tema, a preocupação com dioxinas e furanos ainda persiste em países, como o Brasil, que não usam essa tecnologia.

Entre os objetivos específicos desta tese estava a contribuição para dirimir essa preocupação, especialmente quando se refere ao estado tecnológico atual das plantas modernas de recuperação energética de resíduos por incineração. Isso porque não é por acaso que um país com alta tradição de cuidado ambiental e níveis de poluição urbana relativamente baixos adota a solução como uma das principais alternativas para tratamento de resíduos urbanos.

A confiança nas instituições foi essencial para que a sociedade sueca quebrasse as barreiras da desconfiança, como ficou evidente no episódio da investigação, realizada na década de 1980, sobre a presença de dioxinas e furanos nas plantas de recuperação energética do país.

No aspecto relativo à confiança, toca-se em outro aspecto considerado nos objetivos específicos do estudo: o conhecimento do marco regulatório que possibilitou tal avanço. O controle e a capacidade das prefeituras que detêm a maior fatia do imposto de renda dos contribuintes suecos e, por sua vez, não têm a cultura de interromper ou alterar decisões. Logo, o respeito fiel aos contratos ou parcerias evita a necessidade de agências reguladoras e fiscalizadores, como no modelo de saneamento brasileiro. No caso sueco, o papel de regulador e fiscalizador das empresas prestadoras de serviços públicos (em geral estatais) fica a cargo do próprio Conselho municipal.

A diferença de abordagem dos municípios e diferentes arranjos negociais mostram também que não há uma só forma de viabilizar a gestão apropriada de resíduos com o seu aproveitamento energético. Algumas podem ser mais apropriadas para o Brasil, como a solução encontrada em Helsingborg, de buscar parcerias de empresas privadas, sob o guarda-chuva da estatal de serviços de resíduos sólidos, para fomentar uma cadeia de reciclagem aproveitando a sinergia entre elas (conceito de *cluster*). Tendo em vista as dificuldades do setor público brasileiro, essa pode ser uma solução institucional para melhorar o gerenciamento de resíduos sólidos com apoio privado.

No que tange ao aproveitamento do biogás e do biometano, é notável a cadeia desse combustível que os suecos implantaram. Especialmente por não contarem com uma infraestrutura de distribuição de gás natural relevante, com menos de 700 km de dutos em todo o país.

Para efeito de comparação, só na área de concessão da principal distribuidora do estado de São Paulo há mais de 15 mil quilômetros de rede de distribuição de gás. Os produtores de biometano precisaram prospectar clientes específicos, comprimir ou liquefazer o biogás e transportá-los por caminhões.

O Brasil possui algumas vantagens competitivas frente à Suécia com relação às condições necessárias para a criação de uma cadeia produtiva de biogás que aproveite a fração orgânica dos resíduos. Além de uma quantidade de biomassa residual muito maior, possui grande quantidade de consumidores de combustível gasoso e, perto dos grandes centros consumidores como São Paulo, uma infraestrutura de transporte e distribuição de gás natural já estabelecida que inclui grandes redes de distribuição.

Vantagens significativas e pequenas medidas regulatórias poderiam viabilizar uma cadeia produtiva de biometano e um mercado bem maior do que o sueco, por exemplo, estabelecimento de uma cota de gás renovável nas redes de distribuição de gás, imposto sobre emissão de carbono, descontos tarifários para o consumidor de gás renovável ou mesmo subsídios aos produtores de energias de baixa emissão.

Com alta disponibilidade de matéria-prima, um mercado consumidor de combustíveis gasosos estabelecido e significativa rede de distribuição próximo dos grandes centros consumidores, o Brasil teria as condições propícias para se tornar um modelo no aproveitamento do biometano. No momento, entretanto, o Brasil é que tem muito a aprender.

O Brasil, quanto ao desenvolvimento da incineração de RSU, tem uma desvantagem: a falta de uma rede de calor (no caso do Brasil, de frio) centralizada como no caso do país nórdico. Esse foi um fator crucial para a Suécia, que precisou apenas trocar de combustível na rede de aquecimento já iniciada ainda na metade do século passado. Tratava-se de uma forma que otimizava o rendimento energético dos combustíveis e reduzia a poluição dos sistemas individuais de aquecimento que, junto com automóveis, acabavam por gerar níveis de poluição críticos. No Brasil, também temos sistemas individuais voltados para a climatização que causam grande impacto no mercado elétrico por meio de picos de consumo nos dias e horários mais quentes.

Na Suécia, o sistema de aquecimento centralizado reduziu o impacto da poluição local numa época que outras questões ambientais começavam a preocupar, como a própria questão dos resíduos. No setor de tratamento de esgotos, por exemplo, lançava-se mão da digestão anaeróbica como uma forma de reduzir o lodo das estações de tratamento de esgotos. Nessa época, a Suécia dependia quase totalmente do petróleo importado para suprir as suas demandas energéticas.

A partir das altas do preço do hidrocarboneto, veio a necessidade de substituí-lo por novos energéticos, entre eles os resíduos sólidos urbanos, que já vinham sendo encarados como problemas desde a década de 1960. O biogás gerado na digestão anaeróbica também passou a ser visto como um potencial energético. E as experiências do seu uso no transporte público começaram ainda na década de 1980.

Na segunda metade da década de 1980, apesar da queda dos preços do petróleo, o país continuou a usar os resíduos como alternativa energética, especialmente para aquecimento e eletricidade. É dessa década o questionamento acima mencionado, sobre dioxinas e furanos, que suspendeu por pouco tempo a implantação de novas incineradoras (enquanto o grupo de estudo criado pelo governo não desse o seu veredicto). Assim que os especialistas concluíram que a incineração era um modo aceitável de tratar resíduos domiciliares e industriais, retomou-se a instalação de novas plantas.

Por fim, na última década do século passado, veio a necessidade de descarbonização da economia por conta da disseminação das informações relativas às mudanças climáticas. Logo no início, em 1991, o governo sueco dividiu o imposto sobre a energia em um imposto sobre a energia e outro sobre as emissões. Passou-se a estabelecer metas arrojadas para as energias renováveis, que incluíam a carboneutralidade, até a metade do século XXI. Em 2017, antecipou-se essa meta para 2045.

De lá para cá, também a gestão de resíduos foi ganhando um importante espaço nessa busca por redução das emissões. Os aterros de resíduos tornaram-se indesejados não apenas pelo desperdício material, mas por suas emissões. Na virada do século, ainda no ano 2000, criou-se o imposto sobre o aterramento. Nos anos seguintes, proibiu-se o aterramento de resíduos combustíveis e, depois, dos resíduos orgânicos.

Mas os suecos querem avançar mais. E o país ainda se esforça para subir mais a fração de resíduos destinados aos níveis mais altos da hierarquia, assim como se dedica a reduzir as suas emissões até a sua neutralidade (prevista para 2045). Por isso, propõem metas mais ambiciosas de separação de resíduos (como os orgânicos) e buscam soluções para incentivar os degraus superiores na hierarquia de resíduos.

Dessa forma, países que estão bem menos avançados tanto na gestão de resíduos como na descarbonização da sua economia poderiam tomar lições do que já foi alcançado na Suécia. Para tanto, esse estudo identificou 15 fatores de sucesso e analisou sobre a sua replicabilidade no Brasil.

5.1 FATORES DE SUCESSO IDENTIFICADOS

Após analisar os casos práticos, revisar a literatura sobre RSUs e bem como os depoimentos de especialistas na Suécia, pôde-se perceber que o desenvolvimento do aproveitamento energético de resíduos naquele país ocorreu mediante alguns fatores preponderantes. Assim foram identificados 15 fatores de sucesso abaixo descritos:

- a) combate à poluição gerada por sistemas de aquecimento individual a partir da década de 1950: os sistemas individuais de aquecimento, lareiras e aquecedores domésticos, por exemplo, eram altamente ineficientes, perigosos e principalmente poluentes. Por isso, já naquela época, começaram a se desenvolver sistemas de aquecimento centralizados, que proporcionavam um uso mais racional dos combustíveis e redução significativa das emissões. Eram os sistemas de *District Heating*, que viriam a se tornar essenciais para o aproveitamento energético de resíduos;
- b) minimização dos resíduos das estações de tratamento de esgotos: o início da implantação de digestores anaeróbicos na Suécia, durante as décadas de 1950-60, não teve relação com a necessidade de energia. Em princípio, com o petróleo barato, o país preferia suprir as necessidades energéticas com o combustível importado. O surgimento da tecnologia da digestão anaeróbica naquele tempo teve relação com a preocupação de diminuir o volume e a massa do lodo resultantes das estações de tratamento de esgotos;
- c) necessidade de substituição do petróleo como fonte primordial de energia a partir da crise do petróleo da década de 1970: a despeito de possuir uma significativa geração de eletricidade a partir da hidroeleticidade, até a década de 1970, praticamente todo o resto das necessidades energéticas do país (cerca de 80%) era suprido por tecnologias baseadas na queima do petróleo. A necessidade de mudança dessa condição fez com que se buscassem tecnologias que aproveitassem outras fontes energéticas tanto em aquecimento como em transportes. Daí começa-se a tanto a disseminação do uso de resíduos nos sistemas de *District Heating*, como a pesquisa de utilização de biometano no setor de transporte. É importante salientar que, a despeito da baixa geral do petróleo na década de 1980, o país não voltou atrás na sua busca para evitar a alta dependência do petróleo importado;

- d) processo de construção de confiança nas instituições: um dos grandes questionamentos com relação ao aproveitamento energético de resíduos concentrou-se nas emissões de dioxinas e furanos. Essas emissões suscitaram preocupações no país, no início da década de 1980, mas a partir dos estudos desenvolvidos por uma comissão estabelecida pelo governo, entre 1985 e 1986, considerou-se que a incineração era uma forma de tratamento apropriada também nesse aspecto. O resultado é que a solução da recuperação energética de resíduos por incineração atualmente encontra grande aceitação entre a população sueca;
- e) estabelecimento de um imposto sobre emissões de carbono: desde os anos 1950, a Suécia cobra um imposto sobre uso de energia, que foi essencial para fomentar o uso racional e incentivar a migração do petróleo para outras fontes energéticas na década de 1970. Em 1991, em uma grande reforma trabalhista, o país, já atento à questão climática, dividiu esse imposto de energia em dois, um permanecendo sobre a energia e outro sobre as emissões, proporcionando um grande incentivo para as fontes renováveis que ganhavam, com isso, competitividade, iniciando o processo de descolamento da economia (que continuava crescendo) das emissões (que passaram a decrescer). Esse imposto foi essencial para a recuperação energética por incineração (cerca de um terço apenas é de origem fóssil), mas principalmente para fomentar a busca por soluções tecnológicas que viabilizassem o uso do biometano no transporte;
- f) instituição de imposto sobre aterramento: na virada do século XX para o XXI, o país já buscava soluções para o principal desafio que se anunciava ao século que se iniciava: o desafio ambiental. Em 2000, o país estabeleceu um imposto para evitar o desperdício material e energético do aterramento de resíduos;
- g) proibição do aterramento de resíduos combustíveis: em 2002, o país tomou uma medida muito mais incisiva com relação ao desperdício proporcionado pelo aterramento de materiais ainda aproveitáveis, seja por meio da reciclagem, seja por meio do seu poder calorífico: proibiu que fossem aterrados;

- h) proibição do aterramento de resíduos orgânicos: em 2005, proíbe-se o aterramento de resíduos que pudessem ser usados em digestores anaeróbicos para geração de biogás e biometano (biogás purificado), dando grande impulso para que a fração orgânica dos resíduos sólidos viesse a reforçar a geração de biogás e biometano, cujo substrato principal era composto de resíduos de tratamento de esgotos e industriais orgânicos;
- i) coordenação de ações, regulação e políticas públicas entre instituições governamentais; o aproveitamento energético de resíduos jamais seria uma regra se as abordagens fossem específicas. Sempre há uma solução mais barata para a disposição de resíduos (como aterros) e uma solução energética mais barata (como carvão ou petróleo); contudo, considerando-se a necessidade de redução das emissões de gases efeito estufa, do desperdício material e energético dos aterramentos, da dependência da importação de combustíveis, as formas de aproveitamento energético de resíduos fazem todo o sentido e, para que esses aspectos gerais sejam considerados e abordados de forma efetiva, há de se ter uma coordenação tanto entre os setores (ministérios e agências) governamentais como entre suas instâncias (central, provincial e municipal);
- k) capacitação financeira e operacional dos municípios: no sistema tributário sueco, os municípios ficam com a maior fração dos impostos. Além do mais, essa fração cai diretamente nos cofres municipais. Por essa razão, têm grande capacidade operacional para atender a diretrizes e orientações do governo central e lidar com amplas questões;
- l) ênfase no empreendedorismo estatal: a maior parte das empresas de recuperação energética de resíduos, seja por meio da incineração, seja por meio do biometano, é composta por estatais, propriedades dos municípios. Não se parecem, entretanto, estatais no sentido brasileiro da palavra, uma vez que estão sempre em busca tanto da economicidade quanto da competitividade das suas atividades. Por isso, a maioria tem uma estrutura enxuta, alto nível de automação e decisões baseadas nos custos e benefícios. Também, em sua maioria, são propriedades de um grupo de municípios, o que confere à empresa certa independência administrativa, deixando-a menos suscetível aos interesses políticos;
- m) instituição de tarifa sobre resíduos: as empresas de tratamento de resíduos recebem por seu tratamento (além da venda de energia) e todo o sistema de gerenciamento

de resíduos é financiado por uma tarifa de resíduos (médias anuais de €250 para casas e €150 para apartamentos) que não apenas financia a fração da receita relativa ao tratamento dos resíduos (cerca de 1/3 da receita total de uma incineradora), mas também serve de incentivo para a reciclagem e melhores práticas do usuário (resíduos destinados à reciclagem não são cobrados na tarifa);

- n) integração entre reciclagem e recuperação energética: embora alguns poucos atores suecos achem incompatíveis o grande número de incineradoras com o conceito de economia circular, a imensa maioria deles trabalha, pelo menos num horizonte de uma geração, com a combinação das duas soluções integradas, já que, como visto anteriormente, a separação prévia de metais, vidros e plásticos melhora o desempenho das incineradoras. A perspectiva de que todo e qualquer material possa ser reciclável ainda parece muito distante, até mesmo por conta das misturas de materiais em certos produtos – uma recicladora de plástico ainda gera resíduos. O próprio *cluster* voltado para a economia circular de Helsingborg possui uma grande incineradora para os resíduos não recicláveis. Desses resíduos, é melhor pelo menos recuperar a energia, como mostra a hierarquia de resíduos;
- o) esforço colaborativo entre empresas, academia e Estado: desde meados do século passado, a colaboração entre atores diferentes está no cerne do modelo de desenvolvimento sueco; quando capital e trabalho divulgavam uma versão diferente de “luta de classes”, o país se destaca por buscar soluções cooperativas para os seus problemas e desafios. Ao longo da vivência na Suécia, uma das expressões mais usadas (com orgulho, para referendar o projeto) é a da “*Triple Helix*”, que consistia na parceria entre Estado, empresas e academia;
- p) abordagem integrada das políticas públicas: apesar de sempre ser levada em consideração a economicidade das soluções, há outros aspectos relevados, como a segurança energética e a questão ambiental. Assim ocorreu na mudança das soluções individuais de aquecimento para as centralizadas, no abandono do aterro, na troca dos combustíveis fósseis como combustível das plantas de aquecimento e assim por diante.

5.2 REFLEXÕES SOBRE A REPLICABILIDADE DO SISTEMA NO BRASIL

Verificados os fatores de sucesso do desenvolvimento de um sistema que concilia a recuperação energética dos resíduos, ajudando na formação de uma economia de baixo carbono, e uma cadeia de reciclagem dedicada à economia circular, o estudo tinha como objetivo verificar a replicabilidade dos fatores de sucesso no Brasil.

Em princípio, não há porquê não considerar a possibilidade de utilizar melhor o potencial energético e material dos resíduos sólidos urbanos que, no Brasil, na melhor das hipóteses, é simplesmente aterrado. Dessa forma, seria importante verificar se o país tem as condições suecas para avançar nesse sentido.

Embora cada fator supramencionado e a sua replicabilidade, no Brasil, possam ser objetos de aprofundamentos futuros, objetivou-se abaixo, sem a pretensão de exaurir o tema, analisar a replicabilidade das condições listadas, visando a encaminhar reflexões e desdobramentos em políticas públicas. Abaixo são feitas as considerações sobre fatores de sucesso identificados no caso da Suécia em relação à sua replicabilidade no Brasil. São elas:

- a) combate à poluição gerada por sistemas de aquecimento individual a partir da década de 1950 – no Brasil, não temos tanta necessidade de aquecimento, mas precisamos bastante de frio. Nos últimos anos, o pico do consumo de eletricidade migrou do fim da tarde, quando a maioria da população chegava em casa, tomava banho, ligava as luzes, TV etc. para o meio da tarde por conta do ar condicionado. Um sistema de abastecimento de frio mais racional, embora aparentemente distante da realidade brasileira, poderia ser um apelo para um sistema de recuperação energética dos resíduos que aproveite a energia térmica (facilmente transformada em frio por trocadores de calor);
- b) minimização de resíduos das estações de tratamento de esgotos – a eficiência energética e operacional das nossas estações de tratamento de esgotos está longe do ideal. A razão principal é que basicamente os custos operacionais são, em geral, repassados automaticamente para a tarifa, não incentivando que as empresas responsáveis pelo serviço busquem reduzir seus custos, especialmente aqueles relativos à energia. Uma mudança do marco regulatório que venha a incentivar uma melhor destinação de resíduos e também uma maior eficiência energética das plantas poderia ajudar a buscar melhores soluções, como por exemplo, a aplicação da recuperação energética através da digestão anaeróbica;

- c) necessidade de substituição do petróleo como fonte primordial de energia a partir da crise do petróleo da década de 1970 – o Brasil também avançou em soluções tecnológicas para substituição do petróleo a partir da crise dos anos 1970. Foi dessa época o Proálcool que consolidou o etanol como combustível líquido para o setor de transporte. Etanol esse que tem um papel relevante na redução das emissões de transporte na própria Suécia, que importa volumes significativos desse combustível do Brasil. Entretanto, o Brasil àquela altura, não avançou em outras soluções, como o biometano, nem considerou a possibilidade de usar os resíduos como fonte energética. Preferiu buscar eletricidade em grandes obras hidrelétricas, cada vez mais distantes e, quando o valor do petróleo caiu na década de 1980, o país recuou no avanço do etanol. Retomar políticas que incentivem a segurança energética e o potencial de biomassa do Brasil seria extremamente importante para, ao mesmo tempo, gerar recursos e reduzir as emissões brasileiras;
- d) processo de construção de confiança nas instituições – esse é um dos mais problemáticos fatores que diferenciam a realidade brasileira da sueca. As instituições brasileiras carecem profundamente da confiança dos seus cidadãos. Se o governo criasse uma comissão de estudos sobre um assunto como as dioxinas – como o governo sueco criou nos anos 1980 – e ela desse um parecer favorável sobre soluções já utilizadas no país, isso seria visto com completa desconfiança por aqui. Nesse caso, só um comportamento de longo prazo dos agentes públicos poderia mudar o cenário;
- e) estabelecimento de imposto sobre emissões de carbono – o Brasil tem uma legislação tributária extremamente complicada e, em grande parte, injusta e pouco eficiente no sentido de incentivar as melhores práticas socioambientais dos atores econômicos. Muito se fala de uma reforma tributária, mas a alta dependência da economia do transporte rodoviário, aliada à falta de opções para substituir na sua integralidade os derivados do petróleo, faz com que um imposto sobre as emissões de carbono seja visto com muita reserva. Os impostos teriam de ser implantados na medida em que se retira outros, do modo que se fez na Suécia, onde o imposto das emissões derivou do imposto de energia, que reduziu conforme o novo imposto;
- f) instituição de imposto sobre aterramento – o país encontra enormes dificuldades para destinar de forma minimamente correta os seus resíduos. O aterramento é um desperdício em todos os sentidos e deveria ser desincentivado. Contudo, no caso do Brasil, isso precisa ser feito de forma extremamente cuidadosa, porque um

desincentivo ao aterramento pode, eventualmente, gerar mais disposição descontrolada, ou seja, “lixões”;

- g) proibição do aterramento de resíduos combustíveis – a lei 12305/2010, estabelece que no prazo estipulado por ela (depois prorrogado) sejam aterrados apenas rejeitos ou, segundo a própria lei (art. 3º, inc. XV), “resíduos sólidos que, depois de esgotadas todas as possibilidades de tratamento e recuperação por processos tecnológicos disponíveis e economicamente viáveis, não apresentem outra possibilidade que não a disposição final ambientalmente adequada”. Ou seja, na letra fria da lei, a proibição de resíduos combustíveis já seria uma realidade no prazo estipulado. Esse prazo, entretanto, foi entendido como o prazo final para os “lixões” (que, curiosamente, já deveriam ser proibidos desde a Lei 2.312, de 3 de setembro, pois, em seu artigo 12, a lei estabelece que o “destino final do lixo deverá processar-se em condições que não tragam inconveniente à saúde e ao bem-estar público, nos termos da regulamentação a ser baixada”). Nesse caso, bastaria que os agentes públicos fizessem valer a letra fria da lei;
- h) proibição do aterramento de resíduos orgânicos – no caso dos resíduos orgânicos separados na fonte, a sua conversão em biogás e biometano traz duplo benefício, uma vez que recupera os nutrientes da terra (como a compostagem) e também a energia contida nos resíduos na forma de metano. Todavia, para o seu aproveitamento seriam necessárias tanto uma cadeia de valor de biogás (que poderia ganhar escala a partir de resíduos industriais ou de tratamento e esgotos) quanto uma cultura de separação de resíduos. Dois aspectos que ainda são bastante incipientes no Brasil. Uma política pública de conscientização ambiental seria essencial para preceder esse tipo de medida regulatória;
- i) coordenação de ações, regulação e políticas públicas entre instituições governamentais – esse é um dos principais aspectos complicadores no Brasil, uma vez que, dentro da mesma instância governamental há abordagens distintas. Essa situação se complica se considerarmos as diferentes instâncias (federal, estadual e municipal), os conflitos partidários e a descontinuidade das gestões. Nesse caso, seria importante incentivar ou exigir a realização de consórcios e acordos de cooperação para dirimir essa lacuna de espírito colaborativo das instituições brasileiras, bem como uma atuação mais efetiva das agências de regulação para dirimir a descontinuidade e a insegurança jurídica de investimentos em estações de tratamento;

- j) capacitação financeira e operacional dos municípios – os municípios no Brasil têm poucos recursos e a maioria precisa contar com repasses federais ou estaduais para fechar as suas contas. Essa seria outra razão para incentivar o estabelecimento de consórcios e acordos de cooperação entre eles, no sentido de viabilizar soluções sustentáveis não apenas para tratamento de resíduos, mas para todo o saneamento ambiental que, segundo a Constituição Federal, é de titularidade dos municípios. De todo modo, um novo pacto federativo assegurando que o grosso dos impostos ficassem próximo da fonte, poderia ajudar muito;
- k) ênfase no empreendedorismo estatal – a cultura de apropriação do Estado é outro problema brasileiro que dificulta o estabelecimento de uma política de aproveitamento energético de resíduos, uma vez que as empresas estatais municipais, não obstante a falta de recursos, em geral precisam satisfazer e atender às decisões dos chefes de governo, deixando para trás um comportamento empresarial necessário para alcançar o nível de gerenciamento de resíduos e serviços públicos da Suécia. Rever as limitações das estatais ou delegar à iniciativa privada poderiam ser opções. Dada a complexidade do assunto, tal aspecto mereceria estudos complementares;
- l) instituição de tarifa sobre resíduos – essa taxa visaria remunerar os serviços, mas também educar o comportamento dos geradores e já foi utilizada na prefeitura de São Paulo na década passada, causando grande resistência na população. Outros grandes problemas com relação a essa taxa seriam fraudes e comportamentos inapropriados do usuário, no sentido de levar vantagem, como depositar em lugares distantes da residência (para não caracterizar os resíduos como gerados pelo indivíduo). Uma política de conscientização e mudança cultural seria, portanto, essencial;
- m) integração entre reciclagem e recuperação energética – embora as taxas de reciclagem no Brasil sejam muito baixas, há a percepção de que a recuperação energética de resíduos por incineração competiria com a reciclagem por materiais. Mesmo que as taxas de reciclagem fossem tão grandes como a suecas, ainda haveria espaço para as incineradoras, uma vez que a separação ajuda a eficiência das plantas, pois metais e vidros não são combustíveis e o plástico em excesso aumenta os custos operacionais. Logo, seria importante disseminar esse tipo de informação, especialmente aos principais responsáveis pela reciclagem no Brasil: os catadores;
- n) esforço colaborativo entre empresas, academia e Estado – no Brasil, em geral, as instituições estão muito distantes uma das outras e se veem com desconfiança. Aos

poucos, entretanto, a situação está mudando e surgem parcerias efetivas em projetos específicos. É um longo caminho pela frente; porém, nesse quesito e no longo prazo, o Brasil deve alcançar as melhores práticas;

- o) abordagem integrada das políticas públicas – no Brasil, as políticas públicas são pensadas por segmentos. Cada departamento, cada setor, cada agência, tem uma tarefa específica e trabalha para resolvê-la. Deixa-se de ver o efeito como um todo. Assim, os departamentos de limpeza pública vão buscar a solução mais barata, as empresas e agências de energia idem e assim por diante. Uma mudança nesse *modus operandi* seria urgente para lidar com questões ao mesmo tempo emergentes e interdisciplinares, por exemplo, as mudanças climáticas, que exigem respostas integradas e coesas.

As diferenças bastante significativas entre o Brasil e a Suécia impõem desafios a serem superadas, caso o Brasil queira replicar a experiência sueca. Tirando-se a condição climática (inalterável, mas adaptável: se os suecos precisam de calor, os brasileiros precisam de frio, algo facilmente convertível como mostrado acima), as mais difíceis de replicabilidade sem dúvida, são as adaptações culturais (espírito colaborativo e confiança nas instituições). Essas não são modificações que se alteram no intervalo de uma ou duas gerações. Essas diferenças culturais também podem ser consideradas como obstáculos à aplicação dos demais fatores. De qualquer forma, os 15 fatores podem nortear as políticas públicas brasileiras no sentido de se aproximar do desempenho sueco tanto na gestão de resíduos quanto na descarbonização da economia.

6 CONCLUSÃO

Esta tese teve como objetivo principal, partindo do entendimento em profundidade do *modus operandi* da gestão de resíduos sólidos urbanos na Suécia, endereçar potenciais contribuições à regulação de resíduos, energia e saneamento no Brasil. O intuito maior foi o de melhorar o desempenho da reciclagem e da recuperação energética em território brasileiro e, ao mesmo tempo, contribuir para as questões de saneamento associadas aos resíduos.

Para tanto, a análise tomou como base o estudo de caso sueco no tocante à gestão de resíduos, por se tratar de um país reconhecidamente compromissado com as questões ambientais e considerado um paradigma de eficiência em gestão de resíduos. A metodologia do estudo de caso foi utilizada por se mostrar apropriada para avaliação de fenômenos complexos e em evolução, como a gestão de resíduos, conforme visto no primeiro capítulo deste trabalho.

No presente trabalho, o referido estudo de caso contemplou a realização de visitas técnicas a 15 instalações suecas, sendo 9 de recuperação energética por *incineração* e 6 de recuperação energética de resíduos orgânicos por *digestão anaeróbica* (biogás e biometano), além de entrevistas com especialistas nos locais visitados. Essas atividades foram viabilizadas durante período de intercâmbio de doutorado naquele país, junto à Universidade de Lund.

Uma vez que as pesquisas (especialmente aquelas baseadas em estudos de caso) podem sempre ser aprofundadas e nunca parecem ser suficientemente exaustivas, é importante apontar algumas limitações do presente estudo, fornecendo sugestões para trabalhos futuros. Tais trabalhos poderão vir a sanar, complementar e buscar o aprofundamento das análises aqui realizadas.

É possível considerar a investigação levada a cabo nesta tese ser, no sentido geográfico, como sendo consideravelmente abrangente. Das dez mais populosas cidades suecas, apenas duas – Uppsala e Örebro – não foram visitadas. Entretanto, novos estudos poderão ser mais completos ao contemplar uma amostra ainda maior de cidades, incluindo as supramencionadas, ou mesmo todo o universo das localidades suecas que possuem alternativas modernas para lidar com a gestão de resíduos.

Vale ressaltar, entretanto, que a principal limitação ao objetivo de trazer lições da experiência sueca para o Brasil reside, evidentemente, nas enormes diferenças culturais, regulatórias, econômicas e climáticas entre esses dois países. Conforme visto, o *District Heating*, por exemplo – que envolve utilizar o calor gerado pela incineração dos resíduos para o aquecimento das edificações nas cidades e que foi essencial para o desenvolvimento da atividade de gestão de resíduos na Suécia – não faria sentido no contexto da maior parte das localidades brasileiras, por simples considerações das diferenças climáticas entre esses dois países.

De qualquer modo, com este estudo de caso visou-se, não apenas, a trazer luz para os tomadores de decisão brasileiros, principalmente chamar a atenção para a necessidade de uma concepção de gerenciamento integrado. Tal integração reside numa gestão de resíduos sólidos urbanos associada à satisfação das demandas de geração de energia e da redução das emissões de gases efeito estufa como logrou-se no sistema sueco, além de instigar novas investigações nessa direção.

Para minimizar as limitações de um trabalho baseado na metodologia do estudo de caso, a revisão da literatura levantou inicialmente as principais rotas de aproveitamento energético dos resíduos. Tais rotas destacaram como principais: (i) a *incineração* (dentro das alternativas de *tratamento térmico*) e (ii) a *digestão anaeróbica*.

Conforme visto o *tratamento térmico* pode ser realizado através de várias tecnologias. Elas vão desde o *Mass Burning*, que não exige pré-tratamento, passando pelos *tratamentos por leitos fluidizados*, que exigem um pré-tratamento para homogeneizar os resíduos a ser tratados, até as formas ainda em desenvolvimento de recuperação energética de resíduos, como *gaseificação* e *pirólise*.

Já a digestão anaeróbica, por sua vez gera o biogás, que é composto por metano em sua maior parte, mas também contém uma elevada concentração indesejada de dióxido de carbono. Para ser utilizado em turbinas, bem como na rede de distribuição e em motores calibrados é preciso que o biogás gerado pela aplicação da tecnologia de digestão anaeróbica alcance os mesmos níveis de pureza do gás natural, o qual se chama biometano. As diversas formas de tratamento de conversão do biogás em biometano também foram examinadas pela revisão teórica.

Em seguida, foram considerados os estágios de desenvolvimento e desafios, no Brasil, dos dois setores ligados ao aproveitamento energético de resíduos: o *setor de resíduos* e o *setor energético*. Levantaram-se as condições históricas, as perspectivas e, principalmente, o enorme desafio da universalização e da implementação de melhorias nos tratamentos de resíduos sólidos urbanos no Brasil. Tal levantamento indicou haver uma grande defasagem entre a gestão de RSU no Brasil frente à Suécia.

A contextualização histórica e a descrição da evolução dos setores energéticos e de tratamento de resíduos na Suécia destacam que nem sempre a Suécia foi uma nação rica. De fato, ela chegou a perder grande parte da sua população, no século XIX, em função da elevada pobreza daqueles tempos. A Suécia de elevado padrão de desenvolvimento, em linha com o imaginário mundial, começou a tomar corpo somente com a segunda Revolução Industrial, quando o país aprendeu a tirar proveito, especialmente, do seu potencial hidrelétrico.

Desde então, conforme visto, a Suécia vem se notabilizando por estar em sintonia com os avanços tecnológicos. E o país tem almejado tais avanços numa forma mais colaborativa de desenvolvimento econômico, ou seja, com menos conflitos entre o capital e o trabalho. Outro aspecto importante é o fato de que, já a partir da década de 1960, a Suécia, de forma pioneira, também passou se destacar cada vez mais pela atenção dedicada aos aspectos ambientais, os quais iriam se tornar críticos conforme os impactos das atividades humanas no planeta se mostravam paulatinamente insustentáveis.

Essa atenção colocou a Suécia na vanguarda da questão ambiental mundial. Uma das evidências foi o desempenho na descarbonização da economia que, embora tenha visto seu produto interno bruto crescer 75%, entre 1990 a 2016, suas emissões caíram 26%. As políticas públicas colocadas em prática para lidar com os resíduos tiveram um importante papel nisso e o país conseguiu reduzir significativamente o volume aterrado. Tal volume caiu para menos de 1%, sendo que os outros 99% têm sido aproveitados na economia de energia e materiais, seja através da reciclagem ou propriamente como recurso para a geração de energia.

Durante o intercâmbio de seis meses junto à Universidade de Lund, as trocas de experiências com especialistas e as visitas técnicas realizadas, sumarizadas no Capítulo 4 forneceram as bases para um perfil mais claro dos 15 fatores de sucesso do que foram identificados no Capítulo 5. Muito embora se tenha concluído que a abordagem sueca no tocante ao máximo de aproveitamento dos RSU varie de cidade para cidade, já que elas têm autonomia, o aproveitamento máximo do conteúdo material e energético dos resíduos é um denominador comum entre elas. Isso fica claro nas três maiores cidades do país. Em Estocolmo, por exemplo, no que tange à incineração, uma complexa rede de empresas (em sua maioria privadas) se articula para gerar calor para toda a Grande Estocolmo. Até 2015, a geração de biometano era restrita a empresas de esgotos, quando uma grande planta (também privada) de biometano foi montada para atender a necessidade de aumentar a separação de restos alimentares.

Já as cidades de Gotemburgo e Malmö usam empresas, formadas a partir de um consórcio de municípios, para gerar calor e eletricidade. Em ambas as cidades, ficou claro que o mercado de biometano passa por desafios que terão de ser superados. A Sysav, empresa de Malmö, abortou uma planta de digestão anaeróbica para resíduos e continua a enviar seus resíduos pré-tratados para Kristianstad, a 90 km distante, o que ainda não é uma situação ideal, pelo gasto de energia nesse percurso. Em Gotemburgo, cidade que propaga uma imagem ligada à sustentabilidade, a também estatal Göteborg Energi deixou de expandir um ambicioso projeto de gaseificação de madeira que prometia suprir grande parte do mercado sueco de energia. Tanto em Gotemburgo e Malmö as razões de cancelamento das plantas foram econômicas, o que mostra que, apesar de grande parte dos atores ligados ao aproveitamento energético na Suécia serem estatais, o fator econômico também é uma variável relevante.

Essa diferença de estratégias entre as cidades prossegue quando examinadas as cidades médias. Conforme visto, em Linköping, por exemplo, usa-se uma estatal (Tekniska Verken) para suprir a quase totalidade dos serviços públicos – de energia e saneamento, entre outros. Já em Helsingborg, é a estatal NSR que cuida da gestão resíduos na região, e ela o faz através de parcerias com outras empresas, abrigoando uma espécie de *cluster* para aumentar a eficiência na circularidade dos recursos e na valorização dos materiais extraídos do lixo. Esta última estratégia pode ser de grande valia para o Brasil, que possui um regramento estatal que dificulta soluções como a de Linköping, baseada em uma única empresa estatal cuidando de numerosos serviços de utilidade pública.

As pequenas cidades suecas, por sua vez, também propiciaram lições importantes que podem ser consideradas no caso brasileiro. Tais cidades trabalham não apenas para viabilizar suas plantas de pequena escala, como ocorre em Kil, mas também buscam parcerias com outras cidades para ganhar escala, como ocorre em Karlskoga, que trata resíduos e oferece biometano para as cidades maiores e próximas de Örebro e Karlsstad, e também com Kristianstad, que trata os resíduos alimentares de Malmö.

As principais lições obtidas das análises feitas nesta tese foram sintetizadas e listadas no Capítulo 5, dedicado aos resultados e discussões. Nele foram identificados 15 fatores de sucesso, os quais foram analisados com o objetivo de considerar sua potencial replicabilidade no Brasil. Dentre tais fatores mereceram maior destaque: (i) a abordagem integrada das políticas (não considerar lixo, energia e meio ambiente separadamente); (ii) a integração da reciclagem com a recuperação energética (buscar o aproveitamento ótimo); e (iii) a aplicação de instrumentos econômicos (impostos e taxas) para desincentivar ações que causem prejuízo à sociedade (implementação de impostos sobre emissões de carbono, sobre volumes aterrados, e sobre o volume de lixo gerado).

Assim, o entendimento do caso sueco poderá inspirar os tomadores de decisão no Brasil e auxiliá-los no desenho de políticas públicas para melhorar os níveis de reciclagem e de recuperação energética de resíduos. Certamente, tais políticas contribuirão também para que seja reduzido o uso de combustíveis fósseis e, conseqüentemente, o volume de emissões brasileiras de gases nocivos ao meio ambiente.

REFERÊNCIAS⁷

ABRELPE – Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama de resíduos sólidos no Brasil**. 2017. Abrelpe, 2018. Disponível em: <<http://abrelpe.org.br/panorama/>>. Acesso em: 15 fev. 2017.

ÅKERFELDT, S. **Carbon tax** – a good idea for developing countries? Presentation at the 13th Session of The United Nations Committee of Experts on International Cooperation in Tax Matters New York City December 5, 2016. Disponível em: <http://www.un.org/esa/ffd/wp-content/uploads/2016/12/13STM_Presentation_Akerfeldt_5Dec16.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2018.

ÅKERFELDT, S.; HAMMAR, H. CO2 Taxation in Sweden experiences of the past and future challenges. **Revue Projet**, October 2015. Disponível em: <http://www.un.org/esa/ffd/wp-content/uploads/2016/12/13STM_Article_CO2-tax_AkerfeldtHammar.pdf>. Acesso em: 19 dez. 2016.

AL SEADI *et al.* **Biogas Handbook**. Denmark: University of Southern Denmark, 2008.

ANDERSSON, K. **Bioenergy the Swedish experience**: How bioenergy became the largest energy source in Sweden Ark-Tryckarn, Jönköping, 2015.

ANEEL – Agência Nacional de Energia Elétrica. **Atlas da geração elétrica**. ANEEL, 2009. Disponível em: <http://www2.aneel.gov.br/arquivos/PDF/atlas_par2_cap5.pdf>. Acesso em: 18 jun. 2016.

_____. **Banco de informações de geração**. 2016. Disponível em: <<http://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/GeracaoTipoFase.asp?tipo=2&fase=3>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

ANP – Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Nota Técnica nº: 157/2014/SBQ/RJ**. Rio de Janeiro: ANP, 2014. Disponível em: <www.anp.gov.br/?dw=72846>. Acesso em: 21 nov. 2018.

AVFALL SVERIGE. **Swedish waste management 2017**. Disponível em: <https://www.avfallsverige.se/fileadmin/user_upload/Publikationer/Avfallshantering_2017_eng_low.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2017.

⁷ Elaborado de acordo com a ABNT NBR 6028 (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, 2003).

_____. **Towards a greener future with Swedish Waste-to-energy The world's best example**, 2009. Disponível em:

<http://www.avfallsverige.se/fileadmin/uploads/forbranning_eng.pdf>. Acesso em: 13 maio 2017.

_____. **Waste-to-Energy in Sweden** – suppliers of sustainable solutions. Disponível em:

<http://www.avfallsverige.se/fileadmin/uploads/Exportsatsningen/India_booklet.pdf>. Acesso em: 15 mar. 2017.

BACKMAN, M.; ROGULSKA, M. Biomethane use in Sweden. The archives of automotive engineering. **Archiwum Motoryzacji**. v. 71, n.1: p. 7-19, 2016. Disponível em:

<<http://dx.doi.org/10.14669/AM.VOL71.ART1>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

BALTIC ENVIRONMENT AND ENERGY. **Swedish environmental policies history and present regulations**, 2007.

BARBALACE, R. C. The History of waste. **Environmental Chemistry**. 2003. Disponível em:

<<https://EnvironmentalChemistry.com/yogi/environmental/wastehistory.html>>. Acesso em: jan. 2017.

BEAN, R.; OLESEN, B. W.; KIM, K. W. History of Radiant Heating & Cooling Systems: Part 2. In: **A S H R A E Journal**, v. 52, n. 2, p. 50-55, 2010.

BEM – Borås Energi Och Miljö. **Our dream: a city free from fossil fuels**. Borås, Suécia, 2012.

_____. **The historical journey of Borås Energy and Environment**. Borås, Suécia, 2011.

BENNATI, P. **Políticas públicas e de governo no Estado de São Paulo associadas às mudanças climáticas**. 2005, 112f. Dissertação (Mestrado em Saúde Pública) – Faculdade Saúde Pública, Universidade de São Paulo., São Paulo, 2005.

BEVANGER, L. **First-world problem?** Norway and Sweden battle over who gets to burn waste, DW, 23/11/2015. Disponível em: <<http://www.dw.com/en/first-world-problem-norway-and-sweden-battle-over-who-gets-to-burn-waste/a-18772064>>. Acesso em: 15 jan. 2017.

BIO FUEL NEWS. **EC releases RED II, proposes first-generation biofuels phase-out and new sustainability criterion for forest biomass**, 2016. Disponível em: <http://biofuels-news.com/display_news/11444/ec_releases_red_ii_proposes_firstgeneration_biofuels_phaseout_and_new_sustainability_criterion_for_forest_biomass/>. Acesso em: 18 jun. 2017.

BLOKLAND, M. W. Benchmarking water services delivery. In: M. Kurian and P. McCarney (eds). **Peri-urban water and sanitation services: policy, planning and method**. New York (USA): Springer Verlag, 2010.

BOLOGNESI, A. **Usina de recuperação energética: uma alternativa para a gestão de resíduos sólidos urbanos.** Apresentação realizada na Fiesp 15 de junho de 2010. Disponível em: <<http://www.fiesp.com.br/energia/pdf-10/T4%2010%2008%2010%2030%20Antonio%20Bolognesi.pdf>>. Acesso em: 12 jul. 2016.

BRANDES, R.; BERENYI, E. B. Waste-to-energy, an essential part of sustainable materials management *In*: MICHAELS, T. The 2014 **ERC directory of waste-to-energy facilities**, energy recovery council, 2014. Disponível em: <http://energyrecoverycouncil.org/wp-content/uploads/2016/01/ERC_2014_Directory.pdf>. Acesso em: 22 jun. 2016.

BRASIL. **Lei Nº 11.445**, de 05 de janeiro de 2007. Disponível em: <https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/111445.htm>. Acesso em: 5 abr. 2016.

_____. **Decreto Nº 7.404**, de 23 de dezembro de 2010. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/decreto/d7404.htm>. Acesso em: 11 out. 2016.

_____. **Lei Nº 12.305**, de 2 de agosto de 2010. Institui política nacional de resíduos sólidos dispondo sobre seus princípios, objetivos e instrumentos, bem como sobre as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos, incluídos os perigosos, às responsabilidades dos geradores e do poder público e aos instrumentos econômicos aplicáveis Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2007-2010/2010/Lei/L12305.htm>. Acesso em: 10 out. 2016.

BURANI, G. F. *et al.* **Recurso energético a partir do reuso da água para produção de energia elétrica.** 2003. Disponível em: <http://www.seeds.usp.br/pir/arquivos/CLAGTEE2003_GeraldoBurani1.pdf>. Acesso em: 18 fev. 2016.

BUSINESS SWEDEN, **Bioeconomy in sweden sector overview:** business opportunities in a bioeconomy growth market, 2016. Disponível em: <<http://www.business-sweden.se/globalassets/invest-new/reports-and-documents/bioeconomy-in-sweden---sector-overview-2016.pdf>>. Acesso em: 27 jul. 2017.

BYMAN, K. **Electricity production in Sweden.** IVA's Electricity Crossroads project 2016. Disponível em: <<https://www.iva.se/globalassets/201604-iva-vagvael-elproduktion-english-c.pdf>>. Acesso em: 16 abr. 2017.

CARDOSO, M. T., **Da iluminação das cidades no século XIX às biorrefinarias modernas: história técnica e econômica da gaseificação.** Dissertação (Mestrado em) – Universidade de São Paulo. São Paulo, 2014.

CARDOSO, M. T.; ALVES, F. **Resíduos sólidos.** Apresentação na Câmara Municipal de São Paulo. São Paulo, 22 mar. 2012.

CARLGREN, F. **Agricultural toward Industrial**. Ekonomifakta updated. 2015. Disponível em: <<https://www.ekonomifakta.se/en/Swedish-economic-history/swedish-economic-history2/Agricultural-toward-Industrial/>>. Acesso em: 15 out. 2016.

CHAEMCHUEN, S.; ZHOU, K.; VERPOORT, F. **From Biogas to Biofuel**: materials used for biogas cleaning to biomethane, Chembio Reviews, Wiley on Line Library, 2016.

CLARK, J. The **Burning Issue**: historical reflections on municipal waste incineration AHRB Research Centre for Environmental History 2003. Disponível em: <<https://www.stir.ac.uk/media/wwwstiracuk/cehp/images/burning-issue.pdf>>. Acesso em: 29 abr. 2017.

_____. Sailing Through the Trash and Sewage of Guanabara Bay, **The New Yorker**, 23 ago. 2015. Disponível em: <<http://www.newyorker.com/news/sporting-scene/sailing-through-the-trash-and-sewage-of-guanabara-bay>>. Acesso em :12 jan 2017.

COELHO, S. O potencial de produção de biogás e biometano no Estado de São Paulo. Projeto 27 – Resultados preliminares. In: **Biomethane's contribution to increase natural gas offer in São Paulo State Workshop**, RCGI; GBIO; IEE; USP, setembro de 2016.

COMGÁS. **Relatório de Sustentabilidade 2017**. São Paulo: COMGÁS, 2018. Disponível em: <<http://ri.comgas.com.br/ptb/2427/Relatorio%20de%20Sustentabilidade%202017.pdf>>. Acesso em: 20 jan. 2018.

CORVELLEC, H.; BRAMRYD, T.; HULTMAN, J. **The business model of Swedish municipal waste management companies**, Lund University, May 2011.

CROSS BORDER BIOENERGY PROJECT. **EU handbook biogas markets** October 2012. Disponível em: <http://www.crossborderbioenergy.eu/fileadmin/crossborder/Biogas_MarketHandbook.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2017.

DEFRA – Department for Environment Food and Rural Affairs. **Energy from waste a guide to the debate**, DEFRA, 2014. Disponível em: <<http://www.gov.uk/government/policies/reducing-and-managing-waste>>. Acesso em: 15 out. 2016.

EC – European Commission. **Review of Waste Policy and Legislation**. Disponível em: <http://ec.europa.eu/environment/waste/target_review.htm>. Acesso em: 18 nov. 2016.

ELIASSON, L. **Testemunho em visita técnica a plantas de waste to energy e biometano em Borås WtE plants**, 17 de maio, 2017.

ELLEN MACARTHUR FOUNDATION. **Towards the Circular Economy**. 2013. Disponível em: <<https://www.ellenmacarthurfoundation.org/assets/downloads/publications/Ellen-MacArthur-Foundation-Towards-the-Circular-Economy-vol.1.pdf>>. Acesso em: 27 nov. 2017.

EMAE & Consórcio A&C-Energia-Proema (2010). Elaboração de estudo de modelagem de negócio para implantação de empreendimento de geração de energia a partir de resíduos sólidos urbanos no estado de São Paulo. **Contrato ASE/LPP/2001/01/2009**.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. **Plano decenal de expansão de energia**. 2008-2017. Rio de Janeiro; Brasília: EPE; MME, 07 de novembro de 2008. Disponível em: <[http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-253/topico-317/NT%20-%20Estudos%20socioambientais%20do%20PDE%202008-2017\[1\].pdf](http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-253/topico-317/NT%20-%20Estudos%20socioambientais%20do%20PDE%202008-2017[1].pdf)>. Acesso em: 20 nov. 2018.

_____. **Balanco energético nacional 2014**: Ano base 2013. Rio de Janeiro: EPE, 2014. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-128/topico-99/Relat%C3%B3rio%20Final%202014.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

_____. **Balanco energético nacional 2016**: Ano base 2015. Rio de Janeiro: EPE, 2016. Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-126/topico-94/Relat%C3%B3rio%20Final%202016.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

_____. **Balanco energético nacional 2017**: Ano base 2016. Rio de Janeiro: EPE, 2017. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-46/topico-82/Relatorio_Final_BEN_2017.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2018.

_____. **Balanco energético nacional 2018**: Ano base 2017. Rio de Janeiro: EPE, 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-303/topico-419/BEN2018__Int.pdf>. Acesso em: 20 nov. 2018.

_____. **Balanco Energético Nacional**. 2017. Relatório Síntese – Ano base 2016. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-46/topico-81/Síntese%20do%20Relatório%20Final_2017_Web.pdf>. Acesso em: 2 fev. 2018.

_____. **Nota técnica DEA 16/14** – Economicidade e competitividade do aproveitamento energético dos resíduos sólidos urbanos. Rio de Janeiro; Brasília: EPE; MMA, outubro 2014a. (Série Recursos Energéticos). Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2016%20-%20Economicidade%20e%20Competitividade%20do%20Aproveitamento%20Energetic%20d%5B1%5D.pdf>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

_____. **Nota Técnica DEA 18/14** – Inventário Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos. Rio de Janeiro; Brasília: EPE; MMA, outubro 2014b. (Série Recursos Energéticos). Disponível em: <<http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-251/topico-311/DEA%2018%20-%20Invent%C3%A1rio%20Energ%C3%A9tico%20de%20Res%C3%ADduos%20S%C3%B3lidos%20Urbanos%5B1%5D.pdf>>. Acesso em: 22 fev. 2017.

EUROPEAN COMMISSION. Capital factsheet on separate collection. *In: Assessment of separate collection schemes in the 28 capitals of the EU*, 2014. Disponível em: <<https://www.municipalwasteeurope.eu/sites/default/files/SE%20Stockholm%20Capital%20factsheet.pdf>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

_____. **Energy 2020: a strategy for competitive, sustainable and secure energy**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2011.

_____. **The role of waste-to-energy in the circular economy**. 2011. Disponível em: <<http://ec.europa.eu/environment/waste/waste-to-energy.pdf>>. Acesso em: 26 maio 2017.

EEA – European Environment Agency. **Diverting waste from landfill: effectiveness of waste-management policies in the european union**. EEA Report n. 7/2009, European Environment Agency. Disponível em: <<http://www.eea.europa.eu/publications/diverting-waste-from-landfill-effectiveness-of-waste-management-policies-in-the-european-union>>. Acesso em: 16 jan. 2016.

_____. **Trends and projections in Europe 2017**. Tracking progress towards Europe's climate and energy targets. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2017. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/publications/trends-and-projections-in-europe-2017>>. Acesso em: 15 abr. 2018.

ENERGIGAS SVERIGE. **Biogas in Sweden**, 2011. Disponível em: <<http://www.energigas.se/In-English>>. Acesso em: 15 mar. 2018.

ENERGIMYNDIGHETEN. **Produktion och användning av biogas och rötresten år**. 2015. Disponível em: <<https://www.energimyndigheten.se/globalassets/nyheter/2016/es-2016-04-produktion-och-anvandning-av-biogas-och-rotrester-ar-2015.pdf>>. Acesso em: 10 abr. 2016.

EPA – Environmental Protection Agency. **Wastes – Non-Hazardous Waste – Municipal Solid Waste**. Last updated on 29/03/2016. Disponível em: <<https://archive.epa.gov/epawaste/nonhaz/municipal/web/html/basic.html>>. Acesso em: 29 mar. 2016.

ERICSSON, K. **Introduction and development of the Swedish District Heating systems: critical factors and lessons learned** Lund University, March 2009. Disponível em: <[http://www.res-h-policy.eu/downloads/Swedish_district_heating_case-study_\(D5\)_final.pdf](http://www.res-h-policy.eu/downloads/Swedish_district_heating_case-study_(D5)_final.pdf)>. Acesso em: 12 jun. 2016.

EP – EUROPEAN PARLIAMENT. **Closing the loop:** New circular economy package. January 2016. Disponível em: <[http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573899/EPRS_BRI\(2016\)573899_EN.pdf](http://www.europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2016/573899/EPRS_BRI(2016)573899_EN.pdf)>. Acesso em: 10 out. 2017.

EUR-LEX. Directiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, 23 de abril de 2009, relativa à promoção da utilização de energia proveniente de fontes renováveis que altera e subsequentemente revoga as Directivas 2001/77/CE e 2003/30/CE. **Jornal Oficial da União Europeia**. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=celex:32009L0028>>. Acesso em: 10 out. 2017.

_____. Diretiva 2009/28/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, 23 de abril de 2009. **Jornal Oficial da União Europeia**. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:32009L0028>>. Acesso em: 10 out. 2017.

_____. Diretiva de 2009/30/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, 23 de abril de 2009. **Jornal Oficial da União Europeia**. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0030&from=pt>>. Acesso em: 10 out. 2017.

_____. Diretiva de 2009/33/CE do Parlamento Europeu e do Conselho, 23 de Abril de 2009. **Jornal Oficial da União Europeia**. Disponível em: <<https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32009L0033&from=EN>>. Acesso em: 10 out. 2017.

EUROPEAN INTERNATIONAL GROUP. **Electrical power generation plant from the home waste**, 2012. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=Lgog301EBfE>>. Acesso em: 15 abr. 2018.

_____. **Stockholm Electrical Power Generation plant** – from the home waste without sorting, 2013. Disponível em: <http://www.europeaninternationalgroup.com/uploads/3/4/4/7/34471769/stockholm_electrical_power_generation_plant_from_the_home_waste_without_sorting.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2018.

EUROSTAT. **Urban Europé:** statistics on cities, towns and suburbs, 2016. Disponível em: <<http://ec.europa.eu/eurostat/documents/3217494/7596823/KS-01-16-691-EN-N.pdf>>. Acesso em: 10 jul. 2017.

_____. **Environment:** cities and greater cities table, última atualização 20 de março de 2017. Disponível em: <<http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/submitViewTableAction.do>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

_____. **Greenhouse gas emissions**. Disponível em: <<http://appsso.eurostat.ec.europa.eu/nui/setupDownloads.do>>. Acesso em: 13 dez. 2018.

_____. **Municipal waste statistics**. Disponível em: <http://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php/Municipal_waste_statistics>. Acesso em: 10 jul. 2017.

FMI – Fundo Monetário Internacional. **World economic outlook**. Disponível em: <<https://www.imf.org/external/pubs/ft/weo/2016/01/weodata/index.aspx>>. Acesso em: 12 abr. 2016.

FORTUM, Högdalen. **CHP plant**. Fortum 2019. Disponível em: <<https://www.fortum.com/about-us/our-company/our-energy-production/our-power-plants/hogdalen-chp-plant>>. Acesso em: 27 out. 2017.

FREDÉN, J. **The Swedish recycling revolution**. 2018. Disponível em: <<https://sweden.se/nature/the-swedish-recycling-revolution/>>. Acesso em: 21 nov. 2018.

GARCILASSO, V. P.; COELHO, S. T. RSU no Brasil. **BiomassaBR**, v. 06, n. 26, jul./ago. 2016.

GLOBAL SYNGAS TECHNOLOGIES COUNCIL. **Plasma Gasification**. Disponível em: <<http://www.gasification-syngas.org/technology/plasma-gasification/>>. Acesso em: 20 jul. 2017.

GRAHN, D. **Biogas in Skåne** – regional effort to combat climate change. Apresentação na Kommunförbundet Skåne, Lund em 9 de maio de 2017.

GREATER LONDON AUTHORITY. **District Heating Manual for London**. February, 2013. Disponível em: <https://www.cibse.org/getmedia/843f2dbd-55eb-4c6c-b219-88fe9eb83949/DH_Manual_for_London_February_2013_v1-0.pdf.aspx>. Acesso em: 7 set. 2015.

GREEN GAS GRID PROJECT. **Contribution greengasgrids project to development in biomethane markets, 2014**. Disponível em: <http://www.greengasgrids.eu/fileadmin/greengas/media/Downloads/Other_Downloads/D5.3_Publishable_Report.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2016.

GREEN GOTHENBURG. **Homepage da Green Gothenburg**. Disponível em: <<https://www.greengothenburg.se/>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

GRIPWALL, A. C. **Apresentação realizada na sede da Avfallsverige** (Associação Sueca de Resíduos Sólidos) em Malmö no 10 de março de 2017.

HAGLUND, J. E. **Apresentação durante a visita técnica da planta da Söder Energi** em Södertälje, 17 de junho de 2017.

HANSSON, P.; JONUNG, L. Finance and economic growth: the case of Sweden 1834–1991. **Research in Economics**, v. 51, p. 275–301, 1997.

HASAN, B.; AHSANT, A. **A comparison between two different methods of combustion; Grate-fired and Fluidized bed, applied to a CHP-plant with MSW as fuel**. KTH – Skolan för Industriell Teknik och Management Energiteknik, EGI, 2015.

HENRIQUES, R. M. **Aproveitamento energético de resíduos sólido urbanos: uma abordagem tecnológica.** 2004. 189f. Tese (Doutorado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro – COPPE. 2004. Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/ppe/production/tesis/rachelh.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2016.

HENRIQUES, R. M.; OLIVEIRA, L. B., COSTA, A. O. **Geração de energia com resíduos sólidos urbanos: análise custo benefício.** 2003. Disponível em: <http://www.ecoeco.org.br/conteudo/publicacoes/encontros/v_en/mesa4/10.pdf>. Acesso em: 14 mar. 2016.

HICKMAN, JR, H. L. **A Brief history of solid waste management during the last 50 years – part 9^a: the awakening of waste-to-energy in the us.** 2001. Disponível em: <<http://foresternetwork.com/daily/waste/a-brief-history-of-solid-waste-management-during-the-last-50-years/>>. Acesso em: 17 set. 2017.

HISATUGO, E. Y.; MARÇAL JÚNIOR, O. Coleta seletiva e Reciclagem como instrumento para conservação ambiental: um estudo de caso em Uberlândia, MG. **Revista Sociedade & Natureza**, v. 19, n. 2, 2007.

HOPPE, N. *et al.* **Achenef Organic waste handling on Björkö in Gothenburg.northern.archipelago.** University of Gothenburg, 2017, Disponível em: <https://bioenv.gu.se/digitalAssets/1656/1656403_organic-waste-handling-on-bj-rk---in-gothenburg-northern-archipelago-2017.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2017.

HOWES, P.; WARREN, K., Integration of thermal energy recovery into solid waste management. **IEA Task 36.** 2015. Disponível em: <<http://www.ieabioenergytask36.org/vbulletin/attachment.php?attachmentid=382&d=1396884184>>. Acesso em: 16 fev. 2017.

HRBEK, J. Status report on thermal biomass gasification in countries participating in IEA Bioenergy Task 33. **International Energy Agency**, 2016. Disponível em: <http://task33.ieabioenergy.com/download.php?file=files/file/2016/Status%20report-corr_.pdf>. Acesso em: 13 jul. 2017.

IEA – International Energy Agency. **Energy, Carbon Dioxide and Sulphur Taxation.** 2013. Disponível em: <<https://www.iea.org/policiesandmeasures/pams/sweden/name-21011-en.php>>. Acesso em: 10 set. 2017.

_____. **Upgrading Plant List 2015.** IEA_TASK_37. Disponível em: <<http://task37.ieabioenergy.com/plant-list.html>>. Acesso em: 10 dez. 2015.

INTERNATIONAL DISTRICT HEATING ASSOCIATION. **Handbook of District Heating**, Washington, DC, 1983.

IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada. **Sustentabilidade ambiental no Brasil: biodiversidade, economia e bem-estar humano.** Brasília: IPEA, 2010.

JACOBSSON, S. *et al.* **Holistic waste-to-energy solutions**. Usitall Presentation, 2006.

JAPAN. MINISTRY OF THE ENVIRONMENT. **History and Current State of Waste Management in Japan**. 2014. Disponível em: <http://www.env.go.jp/recycle/circul/venous_industry/en/history.pdf>. Acesso em: 10 fev. 2017.

JENKINS, J. Historic paths to decarbonization. **Breakthroug Journal**, v. 3, April 3, 2012. Disponível em: <http://thebreakthrough.org/archive/which_nations_have_reduced_car>. Acesso em: 7 jan. 2016.

JOHANSON, M. Sustainable Fuel Transportation Using Renewable Fuel. *In: Como acelerar o desenvolvimento sustentável?* FIESP, 28 de set. 2017.

JOHANSSON, T. **Testemunho dado por telefone do escritório da Universidade de Lund**, na cidade de Helsingborg, em 18 de abril de 2017.

JONERHOLM, K. **Production and supply of biogas in the Stockholm region**. Baltic Biogas Bus, 2012.

JONKÖPING POSTEN. **Biogasen i Jönköping ska avvecklas**. Disponível em: <<https://www.jp.se/article/biogasen-i-jonkoping-ska-avvecklas/>>. Acesso em: 27 abr. 2017.

KANDER, A.; STERN, D. I. Economic growth and the transition from traditional to modern energy in Sweden, **Energy Economics**, v. 46, p. 56–65, 2014.

KHAN, I. U. *et al.* Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilization and storage. **Energy Conversion and Management**, v. 150, p. 277-294, 2017.

KILS ENERGI. **Apresentação institucional da Kils Energi**, realizada na cidade de Kil, Suécia em maio de 2017.

LAMPINEN, A. Development of biogas technology systems for transport. **Tekniikan Waiheita**, v. 3, n. 13, 2013. Disponível em: <http://www.ths.fi/Lampinen_TW-3-2013.pdf>. Acesso em: 13 mar. 2017.

LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E.; CORTI, A. Analysis of energy recovery potential using innovative technologies of waste gasification. **Waste Management**, v. 32, p. 640–652, 2012.

LÖNNQVIST, T. **Biogas in Swedish transport: a policy-driven systemic transition**. 2017. Tese (Doutorado em Processos de Energia) KTH – Royal Institute of Technology, 207. Disponível em: <<https://kth.diva-portal.org/smash/get/diva2:1093408/FULLTEXT01.pdf>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

LÖNNROTH, M. The organisation of environmental policy in Sweden: a historical perspective. **Naturvårdsverket**, 2010.

LUND, H. *et al.* 4th Generation District Heating (4GDH) Integrating smart thermal grids into future sustainable energy systems. **Energy**, v. 68, n. 1, 11, 2014.

LUNDGREN, L. J. Sweden's Environment Problems and Protection 1960–2010, **Naturvardsverket**, 2011. Disponível em: <<https://naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-8501-8.pdf?pid=4183>>. Acesso em: 09 jun. 2017.

MAGNUSSON, D. Planning for a sustainable city region? regional District Heating in Stockholm. **ERSA**, 2010. Disponível em: <<http://www-sre.wu.ac.at/ersa/ersaconfs/ersa10/ERSA2010finalpaper509.pdf>>. Acesso em: 15 jul. 2017.

MARTINS, H. Usina passa a produzir biogás a partir de resíduos orgânicos e lodo de esgoto. **Agência Brasil**, 17 de fev. 2018. Disponível em: <<http://agenciabrasil.ebc.com.br/pesquisa-e-inovacao/noticia/2018-02/usina-passa-produzir-biogas-partir-de-residuos-organicos-e-lodo>>. Acesso em: 20 nov. 2018.

MENEZES, R. Estágio atual da incineração no Brasil. In: SEMINÁRIO NACIONAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS E LIMPEZA PÚBLICA, 7, 2000. Curitiba. **Anais...** Curitiba, 2000. Disponível em: <<http://www.resol.com.br/textos/Estado%20Atual%20da%20Incineracao%20no%20Brasil.htm>>. Acesso em: 11 fev. 2017.

MICHAELS, T. **The 2014 ERC directory of waste-to-energy facilities**: energy recovery council, 2014. Disponível em: <http://energyrecoverycouncil.org/wp-content/uploads/2016/01/ERC_2014_Directory.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2016.

MILIOS, L. **Municipal waste management in Sweden**. European Environment Agency, 2013. Disponível em: <<https://www.eea.europa.eu/publications/managing-municipal-solid-waste/sweden-municipal-waste-management/view>>. Acesso em: 13 abril 2017.

MONZONI, M.; OSÓRIO, G. Potenciais para economia de baixo carbono. **Página22**, nov. 2014.

MOKTAN, U. **Biofueled Public Transport for sustainable transportation**: a case study of stockholm and possibility in Kathmandu. Universidade de Estocolmo, 2013. Disponível em: <<http://www.diva-portal.se/smash/get/diva2:638327/FULLTEXT01.pdf>>. Acesso em: 08 maio 2017.

MORRIN, S. *et al.* Two stage fluid bed-plasma gasification process for solid waste valorisation: Technical review and preliminary thermodynamic modelling of sulphur emissions. **Waste Management**, v. 32, p. 676–684, 2012.

MUNICIPAL WASTE EUROPE. **Capital factsheet on separate collection**. 2014. Disponível em: <<https://www.municipalwasteurope.eu/sites/default/files/SE%20Stockholm%20Capital%20factsheet.pdf>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

MUÑOZ, R. *et al.* A review on the state-of-the-art of physical/chemical and biological technologies for biogas upgrading. **Rev Environ Sci Biotechnol**, v. 14, p. 727–759, December 2015. DOI 10.1007/s11157-015-9379-1. Disponível em: <<https://rd.springer.com/article/10.1007/s11157-015-9379-1>>. Acesso em: 05 fev. 2017.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY. **Environmental legislation and the regulation of waste management in Sweden**, 1995. Golden, Colorado, EUA. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/legosti/old/7976.pdf>>. Acesso em: 18 maio 2017.

OECD – Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico. **Waste compendium**. OECD: 2010. Disponível em: <http://www.oecd.org/document/49/0,3343,en_2649_37465_39011377_1_1_1_37465,00.html>. Acesso em: 10 jun. 2016.

OLSSON, K. **Apresentação institucional da Vera Park**, realizada na cidade de Helsingborg, Suécia, em abril de 2017.

ÖSTERLIN, C. **A systems approach to biogas planning in Stockholm**. Universidade de Estocolmo, 2012. Disponível em: <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:575493/FULLTEXT01>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

PERSSON, M.; JÖNSSON, O.; WELLINGER, A. biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection. **IEA Bioenergy**, 2006. Disponível em: <http://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/upgrading_report_final.pdf>. Acesso em: 10 jan. 2018.

PETERSSON, A.; WELLINGER, A. Biogas upgrading technologies: developments and innovations. **Task 37 – Energy from biogas and landfill gas**, IEA Bioenergy, October, 2009. Disponível em: <https://www.iea-biogas.net/files/daten-redaktion/download/publi-task37/upgrading_rz_low_final.pdf>. Acesso em: 10 ago. 2017.

PETROBRAS. **Refinaria gera energia com biogás do Aterro de Gramacho**. 2014. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/fatos-e-dados/refinaria-gera-energia-com-biogas-do-aterro-de-gramacho.htm>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

PHILLIPS, J. A. **Managing America's Solid Waste**. National Renewable Energy Laboratory, 1998. Disponível em: <<https://www.csu.edu/cerc/researchreports/documents/ManagingAmericasSolidWaste1998.pdf>>. Acesso em: 11 nov. 2016.

RASI, S.; LÄNTELÄ, J.; RINTALA, J. Trace compounds affecting biogas energy utilisation – A review, **Energy Conversion and Management**, v. 52, 2011.

REIMANN, D. O. CEWEP energy report III. *In: CEWEP the Confederation of European Waste-to-Energy Plants*, December 2012. Disponível em: <http://www.cewep.eu/m_1069>. Acesso em: 10 jan. 2010.

RENOVA. **From waste to clean energy** – Sävenäs Waste-to-Energy Plant, Gothenburg, 2017. Disponível em: <https://www.renova.se/globalassets/from-waste_to_clean_energy.pdf>. Acesso em: 20 jan. 2017.

RIBEIRO, S. G.; TISI, Y. S. Destinação adequada para resíduos sólidos urbanos. **Valor Econômico**, edição de 19 dez. 2016.

RICHARDS, T. **Testemunho dado ao autor na sede da Höskolan i Borås**, na cidade de Borås, Suécia, em 18 de maio de 2017.

RYCKEBOSCH, E.; DROUILLON, M.; VERVAEREN, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, p. 1633-1645, 2011.

RYLANDER, H. Waste Management in Sweden. **A National Report Waste Management & Research**, v. 3, p. 8-88, 1985.

SABBAS, T. *et al.* Management of municipal solid waste incineration residues. **Waste Management**, n. 24, p. 309-317, 2003.

SALOMON, K. R.; LORA, E. Estimativa do potencial de geração de energia elétrica para diferentes fontes de biogás no Brasil. **Revista Biomassa & Energia**, v. 2, n. 1, 2005.

SCHÖN, L. Sweden: economic growth and structural change, 1800-2000. **EH.Net Encyclopedia**, edited by Robert Whaples, 2008. Disponível em: <<http://eh.net/encyclopedia/sweden-economic-growth-and-structural-change-1800-2000/>>. Acesso em: 13 dez. 2017.

SCHWAB, K.; SALA-I-MARTIM, Xavier. (Eds). **The Global Competitiveness Report 2016-2017**. World Economic Forum, 2016. Disponível em: <http://www3.weforum.org/docs/GCR2016-2017/05FullReport/TheGlobalCompetitivenessReport2016-2017_FINAL.pdf>. Acesso em: 21 nov. 2016.

SEA – Swedish Energy Agency. **Energy in Sweden 2015**. December, 2015. Disponível em: <<https://energimyndigheten.a-w2m.se/Home.mvc?ResourceId=5545>>. Acesso em: 10 jan. 2016.

SECRETARIA DE ENERGIA E MINERAÇÃO (São Paulo). **Maior termelétrica movida a biogás de resíduos sólidos urbanos do Brasil é inaugurada no Estado de São Paulo**. Disponível em: <<http://www.energia.sp.gov.br/2016/09/maior-termelétrica-movida-biogás-de-resíduos-sólidos-urbanos-do-brasil-e-inaugurada-no-estado-de-são-paulo/>>. Acesso em: 16 set. 2016.

SHERRARD, A. Waste to warm the town: new chp plant for expanding Swedish city. **Waste Management World**, 2007. Disponível em: <<https://waste-management-world.com/a/waste-to-warm-the-town-new-chp-plant-for-expanding-swedish-city>>. Acesso em: 15 ago. 2017.

SILVA, C. A. R. Geração de energia a partir de RSU. *In*: CONGRESSO SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 10, 2015. **Anais...** Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/agrener2015/sites/default/files/CARLOSSILVA.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2016.

STRAUCH, S. *et al.* **Biomethane Guide for Decision Makers GREEN GAS GRID Fraunhofer UMSICHT**, Germany, 2013. Disponível em: <http://www.greengasgrids.eu/fileadmin/greengas/media/Downloads/Documentation_from_the_GreenGasGrids_project/Biomethane_Guide_for_Decision_Makers.pdf>. Acesso em: 14 jul. 2017.

STOCKHOLMS LÄNS LANDSTING. **Annual Report**, 2015. Disponível em: <http://www.sll.se/Global/Landstinget/SLL_%C3%85rsredovisning_2015_ENG.pdf>. Acesso em: 10 jul. 2017.

SUMNER, J.; BIRD, L.; SMITH, H. Carbon taxes: a review of experience and policy design considerations. **NREL**, 2009. Disponível em: <<https://www.nrel.gov/docs/fy10osti/47312.pdf>>. Acesso em: 12 maio 2017.

SVENSSON, M. Country Report Sweden. SGC Sweden **IEA Bioenergy Task 37**, October, 2015. Disponível em: <<http://www.iea-biogas.net/country-reports.html>>. Acesso em: 10 jan. 2016.

SVERIGE TELEVISION. **Sjövett**, 1964. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=XrcrX9Qaw2o>>. Acesso em: 12 jun. 2017.

SWEDEGAS. **Gas grid fact file**. Disponível em: <https://www.swedegas.com/Gas_grid/gas_grid>. Acesso em: 19 nov. 2018.

SWEDEN GOVERNMENT. **History of Sweden**. Disponível em: <<https://sweden.se/society/history-of-sweden/>>. Acesso em: 12 mar. 2017.

_____. **Sweden Tackles climate change**. Disponível em: <<https://sweden.se/nature/sweden-tackles-climate-change/>>. Acesso em: 19 jun. 2016

_____. **Swedish Environmental Code**. 2000. Disponível em: <<http://www.government.se/contentassets/be5e4d4ebdb4499f8d6365720ae68724/the-swedish-environmental-code-ds-200061>>. Acesso em: 21 jul. 2017.

SWEDISH ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. A strategy for sustainable waste management Sweden's Waste Plan. **Naturvardsverket**, Stockholm, September, 2005. Disponível em: <<https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer/620-1249-5.pdf>>. Acesso em: 12 fev. 2017. ISBN: 91-620-1249-5

_____. **Sweden's Environment Problems and Protection 1960–2010**, 2011. Disponível em: <<https://www.naturvardsverket.se/Documents/publikationer6400/978-91-620-8501-8.pdf?pid=4183>>. Acesso em: 16 fev. 2017.

THE GLOBAL ECONOMY. **Sweden**: oil consumption consultado em dezembro de 2015. Disponível em: <http://www.theglobaleconomy.com/Sweden/oil_consumption/>. Acesso em: 11 jun. 2016.

THE WORLD BANK. **Datasheet 2014**. Disponível em: <<https://data.worldbank.org/indicator/SI.POV.GINI>>. Acesso em: 11 jan. 2018.

_____. **Sweden**. Data bank. 2018. Disponível em: <<https://data.worldbank.org/country/sweden?view=chart>>. Acesso em: nov. 2018.

THEMELIS, N. J.; MUSSCHE, C. Municipal solid waste management and waste-to-energy in the United States, China and Japan. *In*: INTERNATIONAL ACADEMIC SYMPOSIUM ON ENHANCED LANDFILL MINING, 2. **Proceedings**. Houthalen-Helchteren, 2013. Disponível em: <http://www.elfm.eu/Uploads/ELFM/FILE_73D907E9-8225-4B93-91F8-10F71F59B793.PDF>. Acesso em: 13 jun. 2016.

TORRES, L.; BAJAY, S. Análise das políticas no aproveitamento energético de resíduos sólidos urbanos no Brasil. *In*: CONGRESSO SOBRE GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E ENERGIA NO MEIO RURAL, 10, 2015. **Anais...** Disponível em: <<http://www.iee.usp.br/agrener2015/sites/default/files/tematica8/751.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

TULLBERG, C. **Testemunho dado na planta da Scandinavian Biogas**, na cidade de Huddinge, Suécia, em 7 de junho 2017.

UNEP – United Nations Development Programme. **Human development report**, 2015. Disponível em: <http://hdr.undp.org/sites/default/files/2015_human_development_report.pdf>. Acesso em: 10 jun. 2016.

_____. **Guidelines for national waste management strategies**, 2013. ISBN: 978-92-807-3333-4. Disponível em: <<http://www.unep.org/ietc/Portals/136/Publications/Waste%20Management/UNEP%20NWM%20English.pdf>>. Acesso em: 10 jun. 2016.

_____. **Towards a green economy: pathways to sustainable development and poverty eradication**, 2011. Disponível em: <<http://www.unep.org/greeneconomy>>. Acesso em: 10 jan. 2016.

UNFCCC – Convenção Quadro de Mudanças Climáticas. **Inventário nacional**. Disponível em: <http://unfccc.int/national_reports/annex_i_ghg_inventories/national_inventories_submissions/items/8812.php>. Acesso em: 10 jan. 2016.

VAN CANEGHEM, J. *et al.* Fluidized bed waste incinerators: Design, operational and environmental. **Progress in Energy and Combustion Science**, v. 38, p. 551- 582, 2012.

VEIGA, M. Apresentação. **Encontro Câmara Técnica ABAR** – Associação Brasileira de Agências Reguladoras, São Paulo, 23 de março de 2016.

WELTZIN, M. Saving resources and protecting climate: waste policy concept of alliance 90. The Greens in Germany. *In: ANNUAL NORTH AMERICAN WASTE-TO_ENERGY CONFERENCE*, 18, 2010, Orlando. **Proceedings**. Orlando, 2010.

WILLIAMS, M. Waste-to-energy success factors in Sweden and the United States analyzing: the transferability of the Swedish waste-to-energy model to the United States American. **Council on Renewable Energy**, 2011.

WONG, S. Sweden commits to becoming carbon neutral by 2045 with new law, **Newscientist**, 20 de junho de 2017. Disponível em: <<https://www.newscientist.com/article/2138008-sweden-commits-to-becoming-carbon-neutral-by-2045-with-new-law/>>. Acesso em: 15 out. 2018.

WORLD ECONOMIC FORUM. **Competitiveness rankings 2016**. Disponível em: <<http://reports.weforum.org/global-competitiveness-report-2015-2016/competitiveness-rankings>>. Acesso em: 10 set. 2016.

YERGIN, D. **O petróleo: uma história de conquistas, poder e dinheiro**. São Paulo: Paz e Terra, 2014.

YIN R, K. **Case Study Research: design and methods**. Applied Social Research Method Series: Sage Publications, 2003.

ZABALETA, Amaia. **Sustainability Indicators for Municipal Solid Waste Treatment**. Case study – The City of Stockholm: landfill vs. incineration. 2008. Tese (Master of Science Thesis) – Royal Institute of Technology. Stockholm, 2008. Disponível em: <<http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:402958/fulltext02>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

ZANETTE, A. L. **Potencial de Aproveitamento Energético do Biogás no Brasil**. Dissertação (Mestrado em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE, 2009. Disponível em: <<https://www.osti.gov/etdeweb/servlets/purl/21429297>>. Acesso em: 10 jan. 2018.

Anexo I – Entrevistas realizadas na Suécia

	Empresa	Time	Contact
5 de março	NSR	10h	Kim Ohlsson
10 de março	Ann-Carin Gripwald	10h	Ann Carin Gripwald
27 de março	O2X	10h	Fredrik Olrog
2 de maio	Sysav	9h30	Lina Shahin
2 de maio	Prefeitura de Trelleborg	14h00	Gabriella Eliasson
9 de maio	Biogasyd	10h00	Desiree Grahn
10 de março	Oresundskraft	15h	Martin Tofft
16 de maio	Goteborg Energi	9h30	Ingemar Gunnarsson
16 de maio	GMAB and	13h	Per Lindgren
16 de maio	Business Region	15h	Bernt Svensén
17 de maio	BEM	10h	Linda Eliasson
18 de maio	Boras Hogskola	8h30	Professor Tobias Richards
23 de maio	Oslo Waste-to-Energy Agency	10h00	Cecilie Birgitte Solvang Bjørnethun
26 de maio	Kils Energi	10h	Jonatan Brunbäck
29 de maio	Karlskorga Energi	10:00-12:00	Per Lidell
30 de maio	Vafab Miljo	10h	Jacob Bucht
31 de maio	Malar Energi		Tomás-Aparicio Elena
31 de maio	Mälardalens Högskola	14h	Erik Dahlquist
5 de junho	Swedish EPA (Naturvardsverket)	9h00	Catarina Östlund
7 de junho	Skandinavian Biogas	10h	Carl Tullberg
9 de junho	Skania	10h	Magnus Fröberg
13 de junho	Söder Energi		Jan-Erik Haglund
15 de junho	Linköping Tekniskaverken	10h	Henrik Lindståhl
15 de junho	Avfallsverige Intl	15h00	Stellan Jacobsson
22 de junho	Jönköping Energi	10h	Ola Sjöland
10 de julho	Kristianistad biomethane plant	10h	Bengt Stuhre

Anexo II - Roteiro básico inicial de perguntas aos entrevistados

- 1) De modo geral como se dá a gestão de resíduos na cidade?
- 2) Breve história da empresa.
- 3) Como se integra essa gestão com a geração de energia?
- 4) Como é o marco regulatório do setor?
- 5) A empresa é privada ou estatal e como são tomadas as decisões?
- 6) Quais as estratégias para o maior aproveitamento dos recursos materiais e energéticos dos resíduos?
- 7) Como é financiado o tratamento/ geração de energia?
- 8) Qual a percepção pública da forma de tratamento de resíduos/geração de energia?
- 9) Quais os principais desafios do setor?