

UNIVERSIDADE REGIONAL DE BLUMENAU
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS NO MÉDIO VALE DO ITAJAÍ
COM ÊNFASE NA CONVERSÃO EM ENERGIA ELÉTRICA

LUIZ TADEU ROSA DE MORAES JUNIOR

BLUMENAU
2012

LUIZ TADEU ROSA DE MORAES JUNIOR

**RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS NO MÉDIO VALE ITAJAÍ
COM ÊNFASE NA CONVERSÃO EM ENERGIA ELÉTRICA**

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica do Centro de Ciências Tecnológicas da Universidade Regional de Blumenau, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Elétrica na área de Sistemas de Potência.

Prof. Dr. Sérgio Henrique Lopes Cabral - Orientador

BLUMENAU

2012

Ficha Catalográfica

RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS NO MÉDIO VALE ITAJAÍ
COM ÊNFASE NA CONVERSÃO EM ENERGIA ELÉTRICA

LUIZ TADEU ROSA DE MORAES JUNIOR

Esta dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia Elétrica, Área de Concentração Sistemas de Energia, Linha de Pesquisa em Sistemas Elétricos de Potência, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Regional de Blumenau.

Prof. Dr. Adriano Péres, FURB

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Sérgio Henrique Lopes Cabral, FURB

Orientador

Prof. Dr. Henry França Meier, FURB

Prof. Luiz Henrique Meyer, PhD, FURB

Prof. Dr. Samuel Nelson Melegari de Souza, UNIOESTE

Blumenau, 12 de junho de 2012

RESUMO

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica

Título: Recuperação Energética de Resíduos no Médio Vale do Itajaí com Ênfase na Conversão em Energia Elétrica

Autor: Luiz Tadeu Rosa de Moraes Junior

Orientador: Dr. Sérgio Henrique Lopes Cabral

Data da Defesa: 12/06/2012

O presente trabalho tem o objetivo identificar o potencial da região do médio vale do Itajaí, no estado de Santa Catarina, para a geração de energia elétrica pela aplicação de tecnologias de recuperação energética de resíduos urbanos, conhecida como *Waste-to-Energy Technology* (WTE). Isto devido ao fato da geração a partir de fontes alternativas e renováveis mostrar-se de extrema importância para o desenvolvimento sustentável da economia mundial. Com esta finalidade, esta dissertação faz uma introdução sobre o tema de energias renováveis e versa em linhas gerais sobre as formas de conversão de energia e as tecnologias existentes, em aplicação e em desenvolvimento, no mundo e no Brasil. Também faz uma análise do potencial energético dos recursos renováveis presentes no país, em Santa Catarina e na região do médio vale do Itajaí. O levantamento de dados foi feito com base em artigos científicos, para a obtenção dos dados teóricos. Assim, as tecnologias de incineração, combustão em leito fluidizado, gaseificação, pirólise e digestão anaeróbica, que fazem a conversão da energia contida nos resíduos em energia útil, tais como energia térmica, combustíveis sólidos, líquidos e gasosos, são apresentadas e comparadas. Os dados práticos foram obtidos a partir de casos de referência, que estão em funcionamento na Alemanha e na Suécia, e são analisados para se estimar a eficiência das tecnologias aplicáveis à região do médio vale. Com isso, a capacidade de geração de energia elétrica, através da recuperação energética dos resíduos é estimada para a região estudada, levando-se em consideração as quantidades de resíduos coletadas diariamente e a eficiência aproximada de cada uma das tecnologias.

Palavras-chave: Recuperação energética. Resíduos. Energias renováveis.

ABSTRACT

Graduation Program in Electrical Engineering

Title: Energy Recovery from Waste in Middle Itajaí Valley with Emphasis on Conversion into Electricity

Author: Luiz Tadeu Rosa de Moraes Junior

Advisor: Dr. Sérgio Henrique Lopes Cabral

Date of Presentation: 12/06/2012

This work aims to evaluate the amount of available energy for its conversion into power electricity over the region of middle of the Valley of Itajaí River, in the State of Santa Catarina by using waste-to-energy (WTE) technologies. This is due to the importance of renewable energy investments for sustainable development of a global economy. With this aim, this dissertation presents an introduction about main aspects of renewable energies and it is followed by a discussion about different ways of energy conversion and respective technologies available worldwide, by including Brazil. Then, details about availability of renewable resources and their potential for generation of power electricity in the State of Santa Catarina and in the region of Middle Itajaí Valley are described. Data survey was performed based on scientific articles, for theoretical purposes. Then, technologies in incineration, fluidized bed combustion, gasification, pyrolysis, and anaerobic digestion are given in details and also compared. These technologies convert the energy from wasted material into usable energies like heat, solid, liquid and gaseous fuels. Practical and succeed cases in cities of Germany and Sweden, are presented and thus taken as a reference for estimating the efficiency of proposed technologies for the region of middle of the Valley of Itajaí River. At last, taking into account the total amount of daily collected waste and the efficiency of waste-to-energy technologies the potential of generation of power electricity is estimated for this important industrial region of Brazil.

Keywords: Energy recovery. Waste. Renewable energies.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagrama esquemático de transformação de biomassa [7]	21
Figura 2 - Fontes de energia, conversão e uso	26
Figura 3 - Usina termelétrica	27
Figura 4 - Célula a combustível do tipo PEM (Proton Exchange Membrane)	28
Figura 5 - Usina nuclear	29
Figura 6 - Acelerador de partículas para fusão nuclear.....	30
Figura 7 - Sistemas de reflexão da radiação solar	31
Figura 8 - Conversão de energia solar térmica	32
Figura 9 - Usina geotérmica	32
Figura 10 - Painel e célula fotovoltaica.....	33
Figura 11 - Gerador eólico.....	34
Figura 12 - Usina hidroelétrica	35
Figura 13 - Produção de petróleo e gás [1]	37
Figura 14 - Temperatura global	38
Figura 15 - Nível de CO ₂ na Atmosfera	39
Figura 16 - Projeção do crescimento das emissões de CO ₂	40
Figura 17 - Mapa do potencial hidrelétrico brasileiro.....	51
Figura 18 - Radiação solar média anual, absorvida pela Terra no topo da superfície em W/m ² [41].....	52
Figura 19 - Radiação solar direta anual	53
Figura 20 - Atlas eólico brasileiro	54
Figura 21 - Mesorregiões de Santa Catarina	57
Figura 22 - Energias renováveis não hidrelétricas – Estados Unidos da América	62
Figura 23 - Hierarquia da gestão de resíduos sólidos	65
Figura 24 - Destinação de RSU.....	68
Figura 25 - Estado de desenvolvimento de tecnologias WTE	71
Figura 26 - Estação de tratamento baseada em incinerador.....	73
Figura 27 - Componentes do custo total – Incinerador.....	75
Figura 28 - Sistema de conversão térmica avançada	77
Figura 29 - Usina de biogás	79

Figura 30 - Estação de tratamento de resíduos e aterro com recuperação energética – OVVD.....	84
Figura 31 - Tratamento mecânico biológico – MBT.....	85
Figura 32 - Planta de digestão anaeróbica.....	86
Figura 33 - Planta CHP e de purificação de biogás.....	88
Figura 34 - Recipientes para separação dos resíduos em condomínios.....	89
Figura 35 - Fluxo de resíduos a serem classificados opticamente.....	91
Figura 36 - Etapas do processo de incineração e suas respectivas eficiências de conversão.....	95
Figura 37 - Sistema de gestão de resíduos com incineração.....	97
Figura 38 - Sistema de gestão de resíduos e recuperação energética.....	98

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fontes, energia diretamente convertidas e escala de aproveitamento	36
Tabela 2 - Matriz energética brasileira – Energia Elétrica [36]	49
Tabela 3 - Potencial hidrelétrico brasileiro por bacias [40]	52
Tabela 4 - Produção anual de energia e combustível	93
Tabela 5 - Comparativo das eficiências de conversão entre diferentes tecnologias .	93
Tabela 6 - Valor de energia e volume de gás gerados por tonelada de resíduos	94
Tabela 7 - Valores aproximados de aproveitamento elétrico dos resíduos para diferentes tecnologias	95
Tabela 8 - Quantidade de resíduos coletados na região do médio vale do Itajaí	99
Tabela 9 - Comparativo entre as possibilidades de aplicação de tecnologia WTE .	100

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ADTE	<i>anaerobic-digestion-to-energy</i> – digestão anaeróbica para energia
AMMVI	Associação dos Municípios do Médio Vale do Itajaí
Aneel	Agência Nacional de Energia Elétrica
CH ₄	gás metano
CHP	<i>combined heat and power</i> – calor e energia elétrica combinados
CO ₂	gás carbônico
EIA	Energy Information Administration – Administração de Informações sobre Energia
EMBRAPA	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPRI	<i>Electric Power Research Institute</i> – Instituto de Pesquisas em Energia Elétrica
EUA	Estados Unidos da América
FBC	<i>fluidized bed combustion</i> – combustão em leito fluidizado
Gboe	<i>giga barrels equivalent</i> – bilhões de barris de petróleo equivalente
GLP	gás liquefeito de petróleo
GW	giga watts
GWh	giga watts hora
GWh/ano	giga watts hora por ano
GWh/mês	giga watts hora por mês
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
kg	quilograma
km	quilometro
km ²	quilometro quadrado
km ³	quilometro cúbico
kW	quilowatts
kWh	quilowatts hora
kWh/m ² .dia	quilowatts hora por metro quadrado dia
kWh/m ³	quilowatts hora por metro cúbico
kWh/ton	quilowatts hora por tonelada
m ³	metros cúbicos
m ³ /ano	metros cúbicos por ano
m ³ /ton	metros cúbicos por tonelada

MBT	<i>mechanical biological treatment</i> – tratamento mecânico-biológico
MW	megawatts
MWh	megawatts hora
MWp	megawatts pico
N ₂	nitrogênio
O ₂	oxigênio
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
OVVD	Ostmecklenburgisch-Vorpommersche Verwertungs- und Deponie GmbH
O&M	operação e manutenção
P&D	pesquisa e desenvolvimento
PEM	<i>proton exchange membrane</i> – membrana trocadora de prótons
pH	potencial hidrogeniônico
PCH	pequena central hidrelétrica
PEF	<i>processed engineered fuel</i> – combustível processado de alto poder calorífico
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
PVC	poli cloreto de vinila
RDF	<i>refuse-derived fuel</i> – combustível derivado de resíduo
RSU	resíduo sólido urbano
Sisnama	Sistema Nacional do Meio Ambiente
SNVS	Sistema Nacional de Vigilância Sanitária
SOFC	<i>solid oxid fuel cell</i> – célula a combustível de óxido sólido
SRF	<i>solid recovered fuel</i> – combustível sólido recuperado
Suasa	Sistema Único de Saúde da Atividade Agropecuária
ton	tonelada
ton/ano	toneladas por ano
ton/mês	toneladas por mês
TWh	tera watt hora
TWh/ano	tera watt hora por ano
URSS	União das Repúblicas Socialistas Soviéticas
WTE	<i>waste-to-energy technology</i> – tecnologia de conversão de resíduos em energia
W/m ²	watt por metro quadrado

\$/kW	unidade monetária por quilowatts
\$/kWh	unidade monetária por quilowatts hora
\$/ton	unidade monetária por tonelada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
1.1	OBJETIVOS GERAIS	18
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	18
1.3	ESTRUTURA DO TRABALHO	18
2	DEFINIÇÕES TÉCNICAS	20
2.1	ALTERNATIVO E CONVENCIONAL	20
2.2	ATERRO SANITÁRIO E “LIXÃO”	20
2.3	BIOMASSA.....	21
2.4	BIOGÁS, GÁS DE ATERRO E BIOMETANO	22
2.5	COMPOSTAGEM.....	22
2.6	ENERGIA.....	22
2.7	FONTES E RECURSOS.....	23
2.8	RECICLAGEM.....	23
2.9	RENOVABILIDADE	24
2.10	RESÍDUO.....	24
2.11	REUTILIZAÇÃO	25
2.12	SUSTENTABILIDADE.....	25
2.13	WASTE-TO-ENERGY TECHNOLOGY (WTE)	25
3	CONVERSÃO DE ENERGIA	26
3.1	CONVERSÃO DA ENERGIA QUÍMICA	27
3.2	CONVERSÃO DA ENERGIA NUCLEAR.....	29
3.3	CONVERSÃO DA ENERGIA TÉRMICA – CALOR.....	30
3.3.1	<i>Solar térmica</i>	30
3.3.2	<i>Energia geotérmica</i>	32
3.4	CONVERSÃO DA ENERGIA SOLAR – FOTOVOLTAICA.....	33
3.5	CONVERSÃO DA ENERGIA MECÂNICA – TRABALHO	33
4	ENERGIAS RENOVÁVEIS – MUNDO E BRASIL	37
4.1	SUPRIMENTO ENERGÉTICO	41
4.1.1	<i>Fontes primárias de energia</i>	41

4.1.2 Fontes secundárias	42
4.2 COMPARATIVOS ENTRE FONTES RENOVÁVEIS E NÃO-RENOVÁVEIS	42
4.2.1 Fontes de energia e disponibilidade na natureza	43
4.2.2 Relação das Fontes de Energia com o Poder	44
4.2.3 Fontes Alternativas, Convencionais e em Transição	44
4.2.4 Fontes e desenvolvimento tecnológico	45
4.2.5 Fontes e formas de geração	46
4.2.6 Fontes e a sociedade	46
5 CENÁRIOS BRASILEIRO, CATARINENSE E DO MÉDIO VALE DO ITAJAÍ	48
5.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS NO BRASIL	48
5.1.1 Análise do potencial energético brasileiro para a utilização de energias renováveis para a conversão em energia elétrica	50
5.1.2 Análise de políticas públicas e iniciativa privada, que influenciam o progresso da implantação das energias renováveis, no Brasil	55
5.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS EM SANTA CATARINA	56
5.3 ENERGIAS RENOVÁVEIS NO MÉDIO VALE DO ITAJAÍ	59
6 RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA ATRAVÉS DA GESTÃO DE RESÍDUOS – WASTE-TO-ENERGY (WTE)	60
6.1 VISÃO GERAL E STATUS	60
6.2 GESTÃO DE RECURSOS	64
6.3 COMBUSTÍVEIS E MÉTODOS DE PROCESSAMENTO	67
6.4 TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS	70
6.4.1 Conversão térmica convencional	72
6.4.2 Conversão térmica avançada	74
6.4.3 Conversão biológica	78
6.4.4 Queima conjunta e ciclos híbridos	79
6.4.5 Gás renovável	80
7 APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS, COM ÊNFASE NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO MÉDIO VALE DO ITAJAÍ	81
7.1 METODOLOGIA	81

7.2 ATUAL SITUAÇÃO DA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA REGIÃO DE BLUMENAU	81
7.3 CASOS DE SUCESSO	82
7.3.1 Estação de tratamento de resíduos – OVVD (<i>Ostmecklenburgisch- Vorpommersche Verwertungs- und Deponie GmbH</i>) – Rosenow, Alemanha....	82
7.3.2 Estação de tratamento de resíduos – EVG (<i>Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft mbH</i>) – Rostock, Alemanha.....	84
7.3.3 Gestão de resíduos – Cidade de Borås, Suécia.....	88
7.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS DADOS	93
7.5 POSSIBILIDADES PARA A IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GESTÃO DE RESÍDUOS, COM RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA, NA REGIÃO DE BLUMENAU	96
7.5.1 Primeira possibilidade - Incineração de resíduos pós-reciclagem..	97
7.5.2 Segunda possibilidade – Implantação de tecnologia de tratamento térmico avançado e ADTE	97
7.6 CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS.....	100
8 CONCLUSÃO	103
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	104

1 INTRODUÇÃO

Desde os primórdios das civilizações, diversas formas de energia têm sido utilizadas pelo homem para realizar as atividades do dia-a-dia. A forma mais primitiva é a energia humana, realizada pelos músculos, convertida dos alimentos pelo corpo através do processo de digestão. Após a descoberta do fogo, o homem passou a tirar proveito de sua energia térmica, melhorando seu modo de vida e conseguindo avanços técnicos como a fundição de metais, a preparação de cerâmicas e a criação de novos utensílios. Na época das navegações a energia eólica foi amplamente utilizada por meio das velas das embarcações, e isso possibilitou a expansão comercial e a descoberta de novas terras como o Brasil, fazendo com que houvesse uma distribuição maior das civilizações pelo planeta. Também constituíram papel importante na utilização direta de energia para trabalho mecânico, os moinhos de vento e rodas d'água. Com o surgimento das máquinas a vapor, na revolução industrial, a lenha e o carvão mineral passaram a ser utilizados como fontes de energia. Após a revolução industrial, teve início a utilização em larga escala dos combustíveis fósseis, principalmente o petróleo, que continuam a ser importantes fontes de energia até os dias atuais.

No século XIX a energia elétrica aparece para mudar radicalmente o estilo de vida das pessoas. A maior parte dos desenvolvimentos tecnológicos vivenciados teve início nessa época da história. Por exemplo, com o suprimento de energia elétrica chegando às grandes cidades foi possível o estabelecimento de centros de pesquisa e desenvolvimento que possibilitaram um avanço ainda mais acelerado. As mudanças começaram desde o avanço da iluminação pública elétrica e da invenção do telefone, até os dias de hoje, quando a maioria das atividades do cotidiano requer eletricidade, tal como o uso de eletrodomésticos, condicionadores de ar, computadores, *smartphones*, dentre outros. As mudanças nas formas como se utilizam a energia e o consumo *per capita* aumentaram significativamente. Diversas mudanças também são percebidas na mobilidade urbana, onde o número de automóveis não para de crescer e a demanda por combustíveis obviamente acompanha esse crescimento.

Com isso se pode verificar que as necessidades e prioridades do ser humano vêm sofrendo mudanças ao longo da história. O fato de pesquisas mostrarem que

alguns recursos energéticos podem vir a ter certa escassez em um futuro não tão distante [1] faz com que as formas como os recursos estão sendo utilizados sejam repensadas. O período que ora se inicia traz a sustentabilidade como prioridade, no qual o simples uso da energia não é mais suficiente e os benefícios da utilização de aparatos que consomem energia já fazem parte do cotidiano. Nesse momento a necessidade é de se fazer uso mais eficiente dos recursos, com os menores níveis de desperdício possíveis. A eficiência energética está então em evidência, pois existem tecnologias para evitar perdas desnecessárias em sistemas que tornam possíveis os hábitos da vida moderna. As lâmpadas passam de incandescentes a lâmpadas frias. O uso dos motores à combustão interna na mobilidade, que têm eficiências na ordem de 20% [2], já é questionado e a aplicação de motores elétricos em veículos volta a ter ênfase na indústria automobilística, tanto em tecnologias híbridas quanto em puramente elétrica.

A sustentabilidade é uma forma de se manter os recursos naturais disponíveis e, em conjunto com a eficiência energética, torna o uso desses recursos e de sistemas que necessitam de suprimento energético mais consciente. A utilização de recursos renováveis volta a entrar em evidência, mais de trinta anos depois da sua popularização mais recente, na crise do petróleo da década de 1970 [3]. Os investimentos em energias renováveis são crescentes em diversos países europeus e asiáticos [4]. As energias solar, eólica, geotérmica e da biomassa estão sendo estudadas como nunca, mundo afora. Os desperdícios, como resíduos urbanos, da agricultura e industriais, começam a ser analisados de uma forma diferente. Agora como recursos, ainda mais devido às quantidades desses materiais crescerem em proporções consideráveis [5].

Do ponto de vista da engenharia elétrica sempre há que se fazer uso de alguma forma de energia para se realizar a conversão em eletricidade. Acredita-se que neste momento é necessário para o engenheiro eletricista, que trabalha com a geração de energia elétrica, conhecer as possibilidades diversas de se converter formas diferentes de energia em eletricidade. Conhecer os recursos, sua distribuição e as tecnologias existentes para o aproveitamento energético são fatores a se considerar, portanto.

Dessa forma, este trabalho tem como objetivo fazer uma introdução sobre energias renováveis, mostrar a definição de termos associados a essa área, que ainda não são compreendidos de forma adequada. Devido à multidisciplinaridade

envolvida no estudo das energias renováveis, entende-se como sendo necessária uma explicação descomplicada e objetiva, tal como se propõe neste trabalho, voltada para o engenheiro eletricitista.

Assim, a análise do potencial brasileiro, catarinense e da região de Blumenau para o aproveitamento de recursos renováveis também é realizada. E nesse cenário as tecnologias para a recuperação energética de resíduos se mostra uma possibilidade interessante para a região do médio vale do rio Itajaí Açu, levando em consideração os diversos benefícios proporcionados pela aplicação desse tipo de tecnologia, além da energia elétrica gerada. Estimativas da quantidade de energia elétrica que pode ser aproveitada a partir dos resíduos são feitas com base em duas propostas diferentes. Para se estimar a importância da quantidade de energia que pode ser gerada, esses valores são comparados com o padrão de consumo da região por habitante.

1.1 OBJETIVOS GERAIS

Este trabalho tem como objetivo geral ser uma referência para estudos posteriores na área de aproveitamento energético com ênfase na geração de energia elétrica. Fazer com que algumas informações importantes, que são multidisciplinares, e que são relacionadas à área de energias renováveis sejam reunidas em um único documento e, que uma explicação objetiva a respeito de temas não familiares ao engenheiro eletricitista, seja aplicada.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

O objetivo específico do trabalho é fazer uma análise dos recursos renováveis disponíveis na região do Médio Vale do Itajaí, no estado de Santa Catarina, além de um comparativo entre as principais tecnologias que podem ser aplicadas para o aproveitamento desses recursos. Ao final pretende-se fazer uma estimativa da quantidade de energia que pode ser gerada e a capacidade de abastecimento energético desse montante.

1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 8 seções, sendo que a primeira é a introdução. Os capítulos do desenvolvimento se iniciam da seção 2, e na seção 8 é apresentada a conclusão. No Capítulo 2 são feitas definições de termos e

expressões utilizados na área de energias renováveis. O Capítulo 3 explica as formas de energia presentes na natureza, suas fontes e as conversões necessárias para que se possa ter como produto final a energia elétrica.

Já no Capítulo 4 é feita uma introdução sobre o tema de energias renováveis e sobre as tecnologias de conversão existentes hoje em dia. Além disso, são feitas algumas comparações entre as fontes renováveis e as não-renováveis. No Capítulo 5 uma análise do potencial energético dos recursos renováveis presentes no país, em Santa Catarina e na região do médio vale do Itajaí é apresentada.

O Capítulo 6 fala sobre a recuperação energética dos resíduos e mostra as tecnologias aplicadas para esse fim.

No Capítulo 7 a situação atual da gestão de resíduos na região do Médio Vale do Itajaí é mostrada. Alguns sistemas de recuperação energética, visitados pelo autor, são descritos. Uma análise comparativa dos dados teóricos com os práticos também é feita. Por fim, são apresentadas duas possibilidades para implantação na região em questão e são feitas estimativas das quantidades de energia geradas para as duas situações.

2 DEFINIÇÕES TÉCNICAS

Neste capítulo são apresentadas as definições técnicas e o significado de termos e de expressões mais utilizados na área de energias renováveis e que são mencionados no decorrer do trabalho, para que haja um melhor entendimento sobre o assunto através da diferenciação entre termos os quais têm comumente seus significados confundidos.

2.1 ALTERNATIVO E CONVENCIONAL

O termo alternativo tem como significado o que é proposto em detrimento de um modelo convencional. Já o termo convencional significa comum, ao invés de diferente ou original [6]. Sendo assim, trazendo para o contexto da engenharia elétrica, podem-se classificar tecnologias de conversão e também fontes de energia como sendo alternativas ou convencionais, de acordo com a região ou país para o qual se faz a análise. Um exemplo claro de energia convencional, para a realidade brasileira é o aproveitamento de recursos hídricos para a conversão em energia elétrica. Por outro lado, ainda no cenário brasileiro, a utilização da tecnologia de conversão fotovoltaica pode ser classificada como alternativa, visto que sua utilização ainda é pouco significativa no país. Há ainda fontes de energia que passam por processo de transição entre alternativas e convencionais, um exemplo na atual matriz energética do Brasil, é a energia eólica. Tal recurso vem sendo cada vez mais utilizado, e os investimentos na tecnologia de conversão que utiliza aerogeradores está em ascensão, fazendo com que sua participação nas tecnologias de conversão em energia elétrica seja cada vez mais significativa.

2.2 ATERRO SANITÁRIO E “LIXÃO”

Um “lixão” é uma área de disposição final de resíduos sólidos urbanos sem nenhuma preparação anterior do solo. Não conta com sistema de tratamento de chorume, este penetra pela terra e leva substâncias contaminantes para o solo e lençóis freáticos. Além disso, moscas, pássaros e ratos convivem livremente a céu aberto, sendo vetores de doenças. No Brasil não são raros os “lixões” onde pessoas vivem dos materiais que coletam nesses ambientes.

Já o aterro sanitário é um local projetado para receber os resíduos sólidos urbanos, o terreno é preparado previamente com nivelamento da terra e selamento da base com argila, pedras e mantas de PVC (poli cloreto de vinila). Isso evita a contaminação do solo e dos lençóis freáticos. Uma tubulação coleta o chorume que é encaminhado para um reservatório onde é tratado, em um sistema de tratamento de chorume.

2.3 BIOMASSA

Material rico em carbono, que ainda não é um material fóssil. Todas as plantas e animais do sistema ecológico pertencem à biomassa. Além disso, nutrientes, excrementos, resíduos orgânicos domiciliares e industriais são biomassa.

Existem diversos tipos de processos para transformar biomassa em combustíveis nas formas sólida, líquida e gasosa, como mostrado na Figura 1. Esses tipos incluem combustão, transformação termoquímica via carbonização, liquefação ou gaseificação, transformação físico-química por compressão, extração, transesterificação, e transformação bioquímica por fermentação alcoólica ou anaeróbica [7].

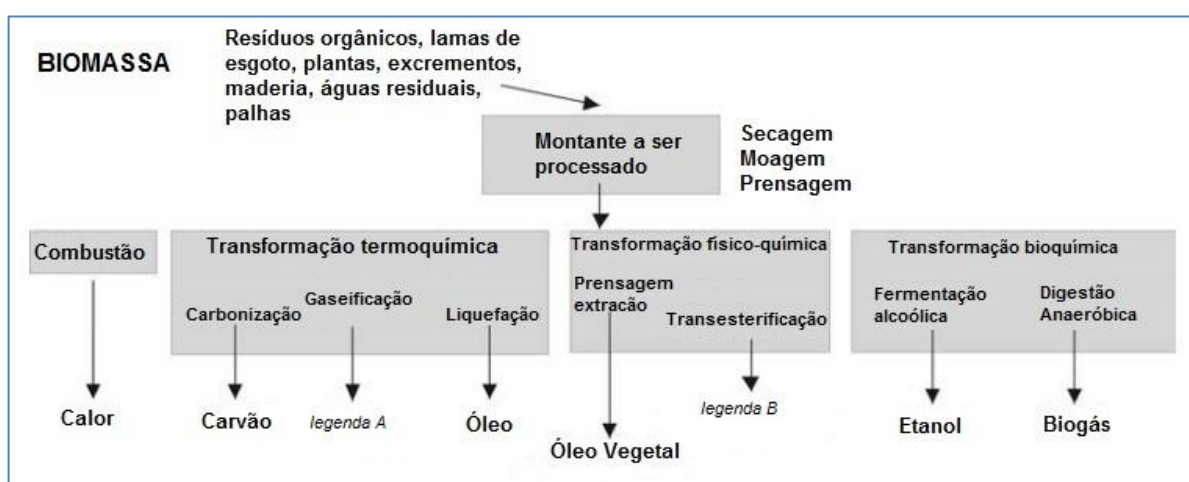


Figura 1 - Diagrama esquemático de transformação de biomassa [7]

A legenda A, na Figura 1, corresponde ao produto da gaseificação que pode ser uma mistura de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO), metano (CH_4), hidrogênio (H_2), e outros hidrocarbonetos de cadeia curta. Já a legenda B corresponde ao produto da transesterificação, que é um processo dedicado a óleos vegetais ou gorduras animais com baixo índice de acidez, “gorduras amarelas”. Para

resíduos gordurosos com elevados índices de acidez, “gorduras marrons”, a reação é a de esterificação.

2.4 BIOGÁS, GÁS DE ATERRO E BIOMETANO

Quando um material orgânico é decomposto na ausência de oxigênio, este processo é denominado de digestão anaeróbica. O gás que é liberado é conhecido como biogás, e é composto de aproximadamente 40 a 70% de metano (CH_4) e de 30 a 40% de dióxido de carbono (CO_2) além de outros gases, porém em quantidade menos significativa. Este tipo de transformação ocorre abundantemente na natureza como em pântanos, no trato digestivo de animais ruminantes, assim como em campos alagados de arroz [7]. Por sua vez o gás de aterro também é oriundo da digestão anaeróbica. No entanto, no aterro sanitário ela ocorre com menos controle que em digestores apropriados. A composição deste gás tem menores níveis de metano, da ordem de 40 a 55%, o que faz com que seu poder calorífico seja menor que o do biogás. O biometano é o resultado do processo de purificação do gás de aterro ou, mais comumente, do biogás para alcançar o padrão de gás natural, com níveis maiores que 96% de metano, além de concentrações máximas de sulfeto de hidrogênio e teor de umidade requeridos. Quanto ao poder calorífico de cada um dos gases, o teor de metano é a informação mais significativa. Por isso os valores podem variar de 5,8 a 7 kWh/m³ para gás de aterro e biogás, e atingir 14 kWh/m³ para níveis mais puros de metano como o caso do biometano [8]

2.5 COMPOSTAGEM

Segundo definição feita pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMBRAPA, compostagem é um processo biológico de transformação da matéria orgânica crua, biodegradável, em substâncias húmicas (matéria orgânica estabilizada). A compostagem é um processo de digestão aeróbica da matéria orgânica por microrganismos em condições favoráveis de temperatura, umidade, aeração, pH e qualidade da matéria-prima disponível [9].

2.6 ENERGIA

A definição básica, da física, diz que energia é a capacidade de realizar trabalho [10]. E que trabalho é, por exemplo, força (F) multiplicado por deslocamento (d). No entanto, energia representa mais do que isso. Segundo a definição da Física

moderna existem cinco formas fundamentais de energia, sendo elas: Energia Gravitacional, Energia Elétrica, Energia Magnética, Energia Atômica de Ligações Fortes e Energia Atômica de Ligações Fracas. E que a inter-relação dessas formas de energia faz com que a vida na Terra seja possível. Isso pode ser evidenciado pelo crescimento das plantas, a formação dos ventos, a formação das chuvas e rios. Para que tudo isso seja possível é necessário que energia e matéria estejam presentes e se relacionando. Aliás, segundo esse raciocínio energia é tudo.

A energia não pode ser criada ou destruída, apenas modificada em sua forma. Segundo o princípio da conservação da energia, a quantidade total de energia em um sistema isolado permanece constante. Sendo assim os termos utilizados na Engenharia como geração de energia elétrica ou térmica, não estão totalmente de acordo com a Física, porém já são consolidados, mas em alguns momentos serão evitados neste trabalho [11].

2.7 FONTES E RECURSOS

Materiais são retirados dos recursos do planeta, conhecido como o capital natural. Recursos naturais são ambos os suprimentos, conhecidos e desconhecidos, de um determinado material. Reserva é o suprimento conhecido de determinado material. A reserva de um material depende de condições econômicas, técnicas e legais. Usando-se um pouco de matemática, pode-se equacionar assim:

$$\text{Fonte} = \text{Recursos} + \text{Reserva}$$

$$\text{Recursos} = \text{Recursos renováveis} + \text{Recursos não-renováveis}$$

2.8 RECICLAGEM

No Brasil, algumas diretrizes com relação à gestão de resíduos sólidos foram instituídas em 2010 pela Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) [12], e nela consta a definição de reciclagem como sendo o processo de transformação dos resíduos sólidos que envolve a alteração de suas propriedades físicas, físico-químicas ou biológicas, com vistas à transformação em insumos ou novos produtos. Sendo que precisam ser observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes do Sistema Nacional do Meio Ambiente (Sisnama) e, se couber do Sistema Nacional de Vigilância Sanitária (SNVS) e do Sistema Único de Saúde da Atividade Agropecuária (Suasa).

2.9 RENOVABILIDADE

Um recurso pode ser considerado renovável quando ele é disponibilizado pela natureza a uma taxa maior ou igual à taxa que se consome este recurso. A substituição envolve normalmente o retorno ao seu estado original. Recursos baseados em biomassa são de natureza renovável se consumidos a uma taxa menor que a taxa de cultivo. Já os recursos não-renováveis são aqueles que existem em uma quantidade finita, a qual não pode ser restaurada por processos naturais em um tempo razoável e um consumo excessivo levará ao esgotamento deste recurso. Exemplos de recursos não-renováveis são os minerais e combustíveis fósseis.

2.10 RESÍDUO

A definição de resíduo pode ser bastante subjetiva, pois o que representa resíduo para alguém pode representar um recurso valioso para outro. Contudo, resíduo deve ter uma definição legal rigorosa, porque tal definição estrita de resíduo tem implicações financeiras e legais nos negócios, autoridades locais e governos.

Resíduos ainda podem ser classificados em resíduo sólido urbano, resíduos de atividade agrícola e resíduos de atividade industrial. Além disso, ainda existe o resíduo urbano, que é basicamente esgoto.

Segundo definição feita na PNRS, resíduo sólido urbano (RSU) é 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 [12]. Existe ainda o RDF (Refuse-derived Fuel), que é o resultado do resíduo sólido urbano que passa por processo de separação mecânico-biológica, sendo composto basicamente por plásticos, tecidos e materiais biodegradáveis, e assim tem seu poder calorífico aumentado. Resíduos de atividade agrícola geralmente são restos de cultura e esterco. Resíduo Industrial podem variar muito de composição dependendo da atividade de cada indústria.

2.11 REUTILIZAÇÃO

Seguindo a definição feita na PNRS, pode-se dizer que reutilização é o processo de aproveitamento dos resíduos sólidos sem sua transformação biológica, física ou físico-química, observadas as condições e os padrões estabelecidos pelos órgãos competentes dos Sisnama e se couber, do SNVS e do Suasa [12].

2.12 SUSTENTABILIDADE

Desenvolvimento econômico que leva em consideração as consequências ambientais das atividades econômicas e baseia-se na utilização de recursos que podem ser substituídos ou renovados e, portanto, não serão esgotados [13].

2.13 WASTE-TO-ENERGY TECHNOLOGY (WTE)

É a tecnologia que converte a energia química contida nos resíduos em energia útil, como por exemplo energia térmica e elétrica. Esta tecnologia será mais detalhada no Capítulo 6.

3 CONVERSÃO DE ENERGIA

Parte considerável de toda a energia consumida da Terra é resultado da conversão da energia solar em outras formas de energia. A energia fornecida pelas fontes pode ser convertida nas diversas formas de energia útil como calor, trabalho mecânico e eletricidade. Neste capítulo é dado enfoque aos sistemas de conversão de energia. A conversão em energia elétrica é feita a partir da utilização de diversas formas de energias, provindas de diferentes fontes, por intermédio de sistemas de conversão. Como explicado no Capítulo 2, a energia pode se apresentar em diversas formas na natureza, sendo assim, para cada forma de energia existem particularidades que precisam ser analisadas para que se possa realizar a conversão em energia elétrica.

A Figura 2 mostra as fontes de energia, assim como a forma de energia que elas fornecem, e também as etapas necessárias até que a energia seja convertida em energia elétrica.

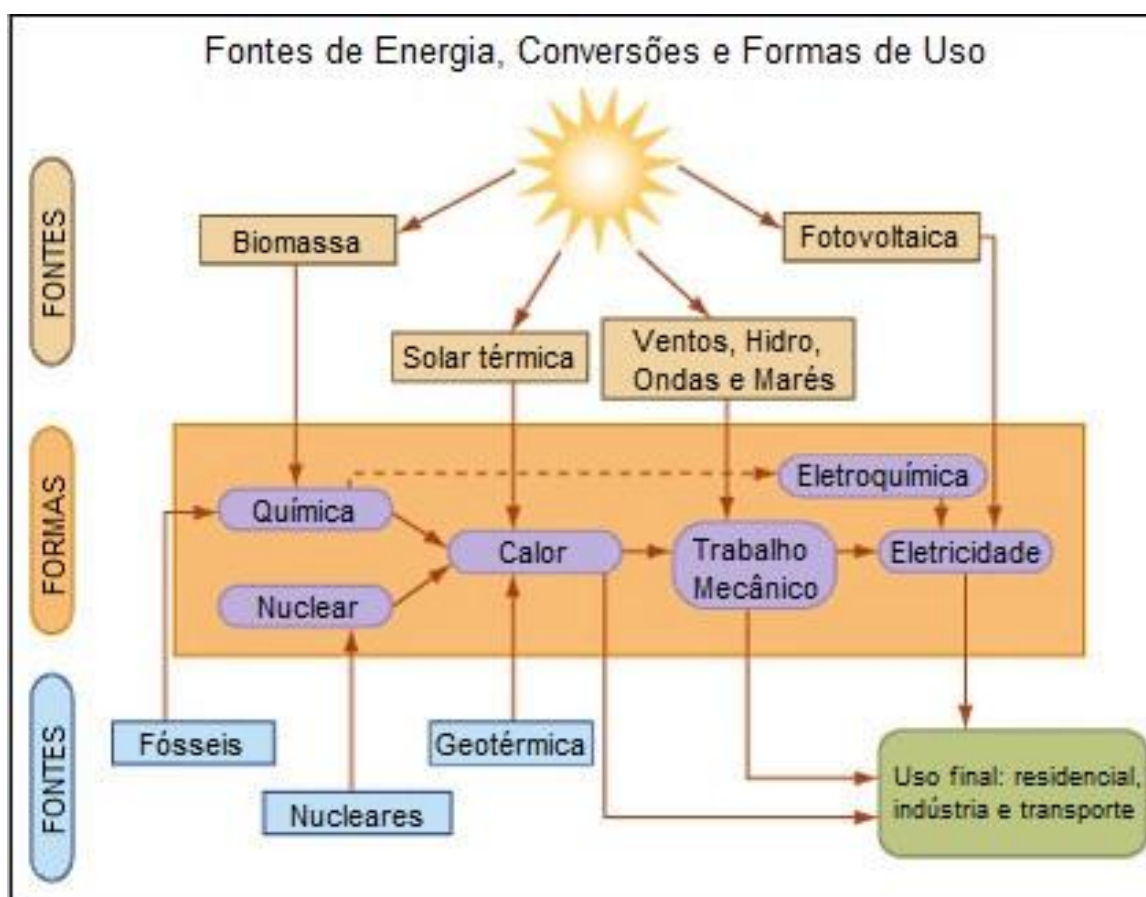


Figura 2 - Fontes de energia, conversão e uso

Fonte: MIT Open Course Ware [14]

Analisando a Figura 2 verifica-se que as formas de conversão que convertem diretamente em energia elétrica são: conversão eletromecânica, conversão fotovoltaica e conversão eletroquímica de energia. No entanto, algumas fontes de energia não podem ser convertidas diretamente em energia elétrica, sendo assim necessárias algumas conversões adicionais.

3.1 CONVERSÃO DA ENERGIA QUÍMICA

Para o caso da biomassa, seus combustíveis derivados e combustíveis fósseis, a forma de energia contida é a química. Para que se possa converter esta energia em eletricidade pode-se fazer uso de máquinas térmicas, nas quais a queima dos combustíveis gera calor, este calor é então convertido em trabalho mecânico através de vapor em turbinas ou diretamente pela explosão que ocorre em motores a combustão interna. O torque gerado no eixo da máquina térmica é então utilizado para mover um gerador elétrico. A figura 3 mostra o arranjo de uma usina termelétrica.

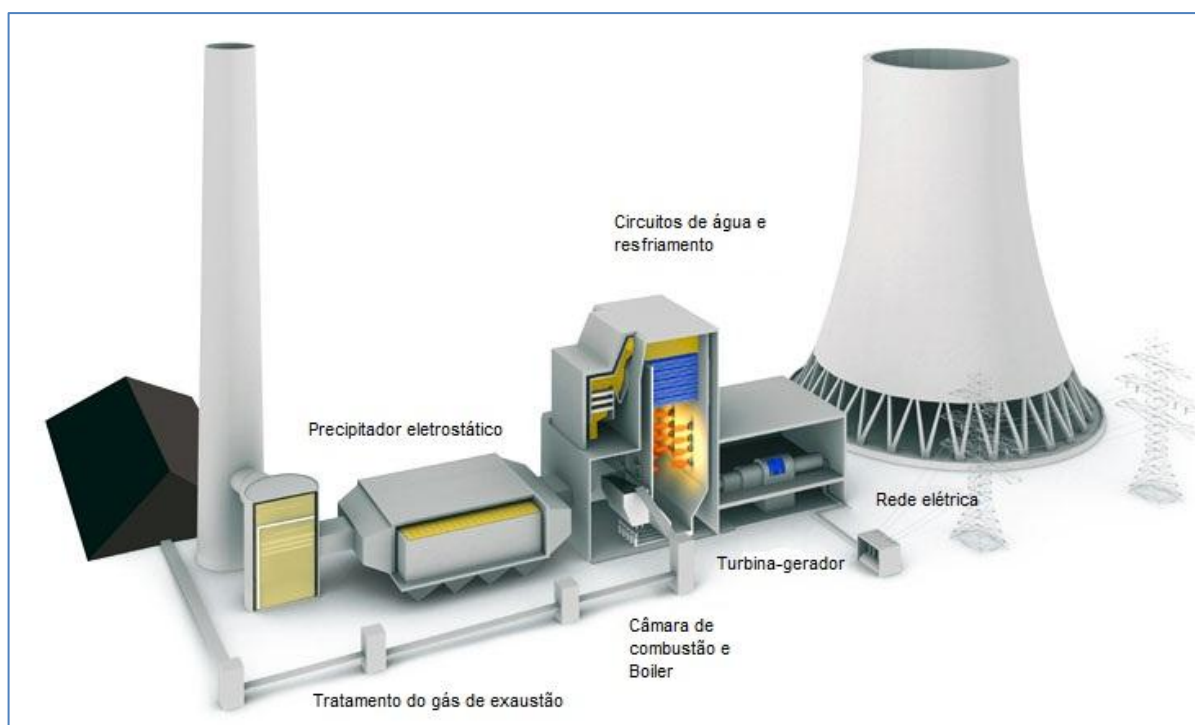


Figura 3 - Usina termelétrica

Fonte: Steag [15]

A tecnologia de conversão eletroquímica, mostrada na Figura 4, representa a possibilidade de conversão da energia química, diretamente em energia elétrica. O equipamento que faz essa conversão é chamado de célula a combustível, e utiliza o

gás hidrogênio como combustível. O princípio básico de funcionamento das células a combustível consiste da passagem do fluxo de hidrogênio no interior da célula, onde no eletrodo de difusão gasosa, anodo, os prótons tomam um caminho diferente dos elétrons, passando através da membrana. Já os elétrons, como não conseguem passar pela membrana tomam o caminho do circuito, gerando assim uma corrente elétrica que flui por uma carga conectada aos eletrodos. No outro lado o circuito se fecha com o outro eletrodo de difusão gasosa, catodo, e os prótons H^+ se combinam com o oxigênio do ar, formando assim moléculas de água. Os produtos dessa transformação são energia elétrica, calor e água. Sendo uma forma limpa de se aproveitar energia na forma química.

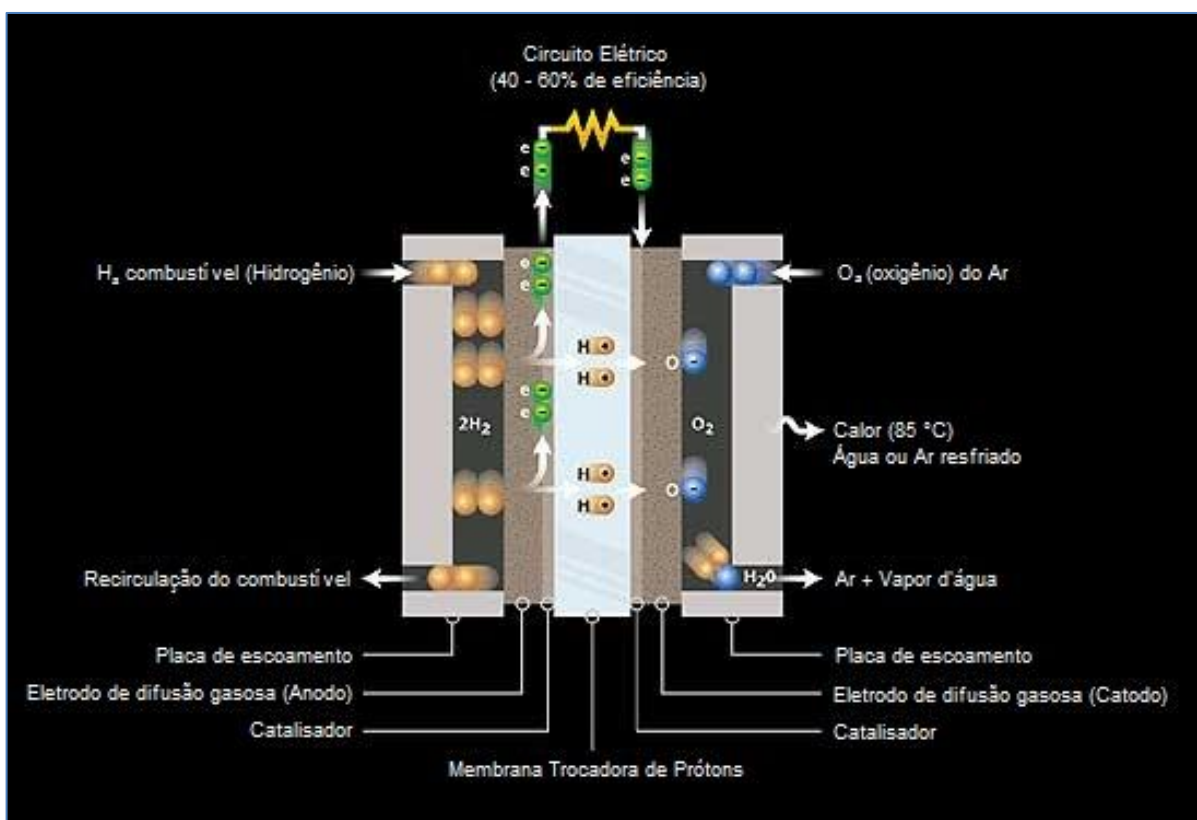


Figura 4 - Célula a combustível do tipo PEM (*Proton Exchange Membrane*)

Fonte: Ballard Power Systems [16]

É importante salientar que o combustível da célula é o hidrogênio na forma gasosa. Dessa forma para a utilização de outros combustíveis, algumas tecnologias devem ser aplicadas previamente, como é o caso da reforma gasosa inclusa no processo de utilização do biogás e do gás metano em células a combustível de dióxido sólido (SOFC), onde o combustível passa por um processo onde o produto final é o hidrogênio.

3.2 CONVERSÃO DA ENERGIA NUCLEAR

A energia nuclear utilizada em larga escala para a geração de energia elétrica é a da fissão nuclear. Um esquema mostrando o funcionamento de uma usina nuclear pode ser visto na Figura 5. A energia gerada através das reações nucleares, tem como resultado a liberação de calor, este é então aproveitado para aquecimento de água para geração de vapor, que alimenta uma turbina e move um gerador.

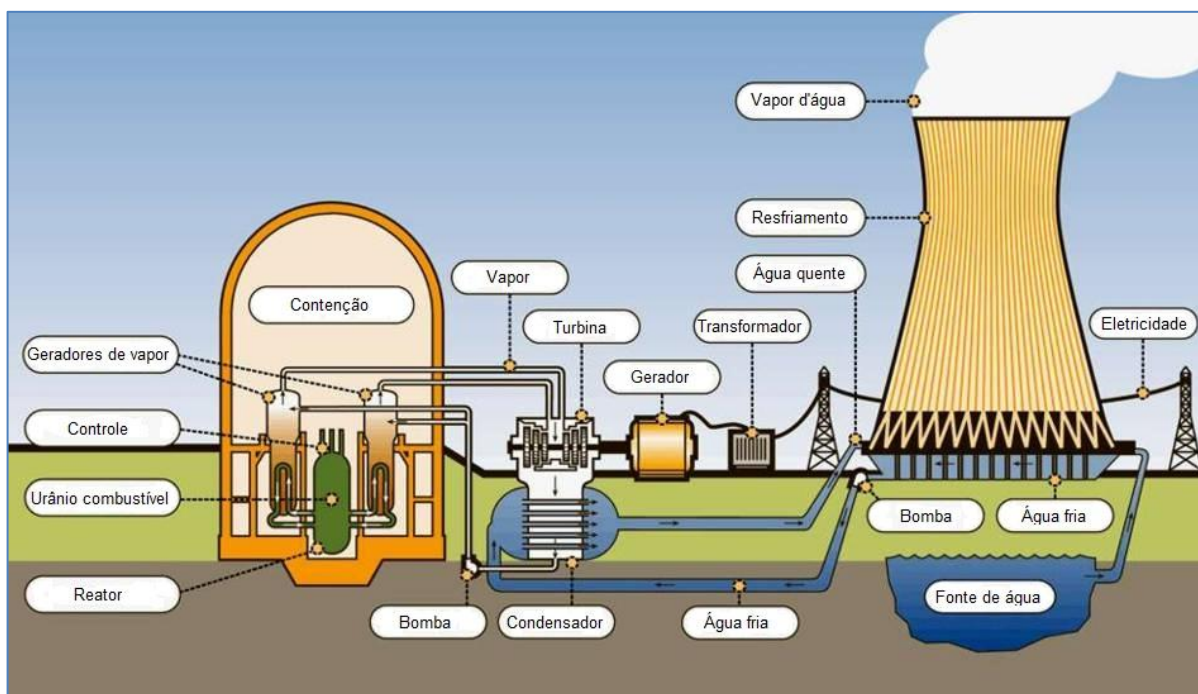


Figura 5 - Usina nuclear

Fonte: Area Seg [17]

A energia da fusão nuclear, hoje ainda se encontra em fase de pesquisas como as feitas pelo Instituto Max Planck de pesquisas em plasma [18], localizado na cidade de Greifswald, na Alemanha, visitado pelo autor do trabalho. Neste instituto o projeto de um acelerador de partículas que tenta reproduzir o efeito que ocorre no interior das estrelas, a fusão do hidrogênio, está em desenvolvimento com o objetivo de gerar energia elétrica a partir da conversão do calor das reações que ocorrem no interior do reator. A Figura 6 mostra como é a estrutura do acelerador que está em fase de pesquisa. No qual bobinas que geram um campo magnético, representadas em cor azul na Figura 6, são necessárias para se manter o controle do movimento das partículas no interior do acelerador.

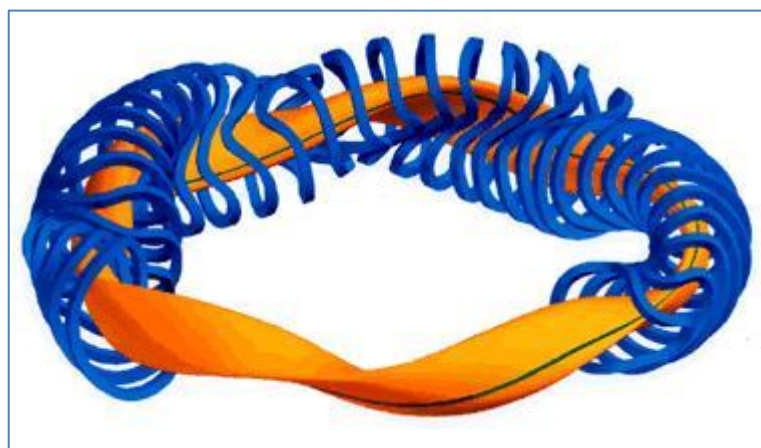


Figura 6 - Acelerador de partículas para fusão nuclear

Fonte: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik [18]

3.3 CONVERSÃO DA ENERGIA TÉRMICA – CALOR

O calor pode ser aproveitado da radiação solar e de fontes geotérmicas, diretamente das fontes de energia. A forma mais comum de se utilizar esses recursos, para a conversão em energia elétrica, é fazendo com que esse calor gere vapor para movimentar um grupo turbina-gerador. Como mostrado anteriormente, o calor pode também ser oriundo da utilização de energia nuclear e química.

3.3.1 Solar térmica

A radiação solar pode ser utilizada para aquecimento de água ou outro fluido, geralmente com o auxílio de refletores que concentram os raios do sol, gerando assim vapor necessário para alimentar uma turbina, e por consequência movendo um gerador elétrico. Como ilustrado na Figura 7, existem diversas tecnologias de captação da radiação solar que fazem uso de sistemas de reflexão, os mais conhecidos são:

- I. Coletor parabólico de calha
- II. Coletor linear de Fresnel
- III. Receptor central com coletor de disco
- IV. Sistema de recepção central com refletores distribuídos

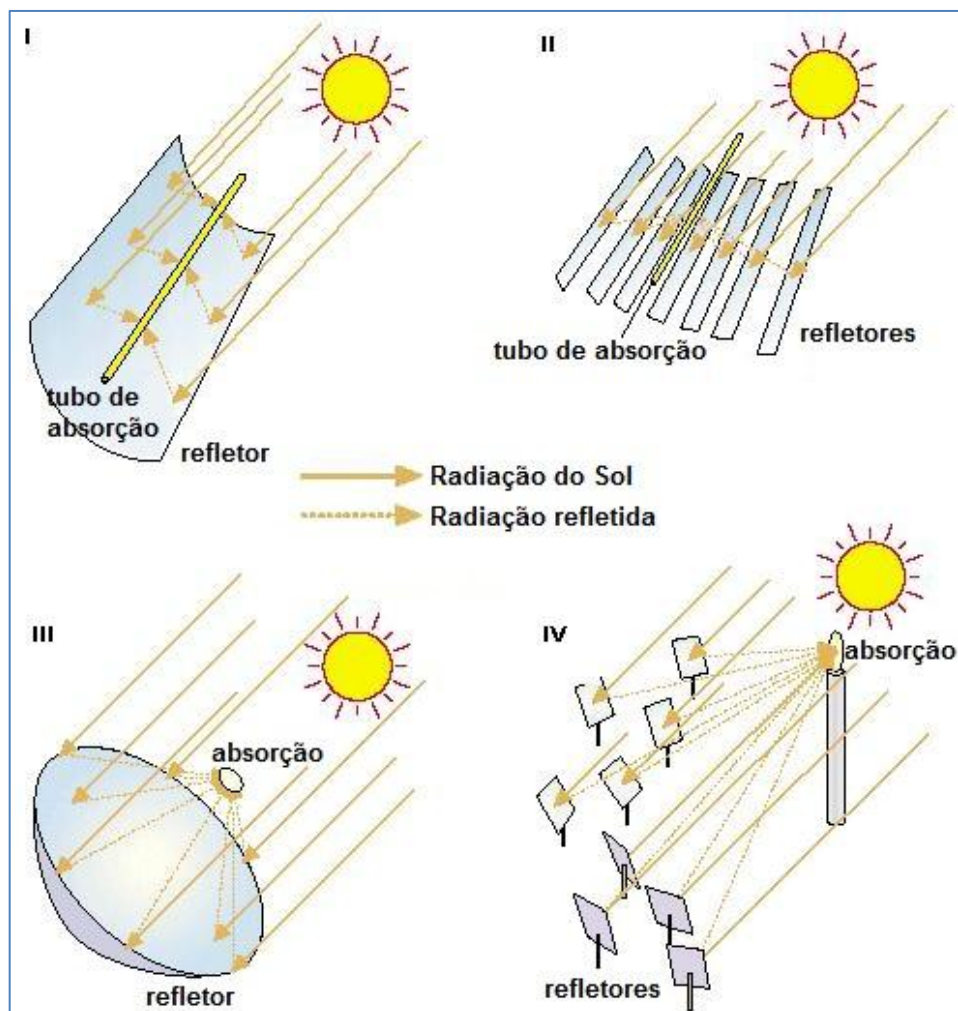


Figura 7 - Sistemas de reflexão da radiação solar

Fonte: Volker Quaschnig [19]

Na Figura 8 pode-se verificar como funciona o fluxo da energia térmica em um sistema desses, desde os coletores de radiação solar até a turbina que move o gerador, e este último então, conectado a rede elétrica.

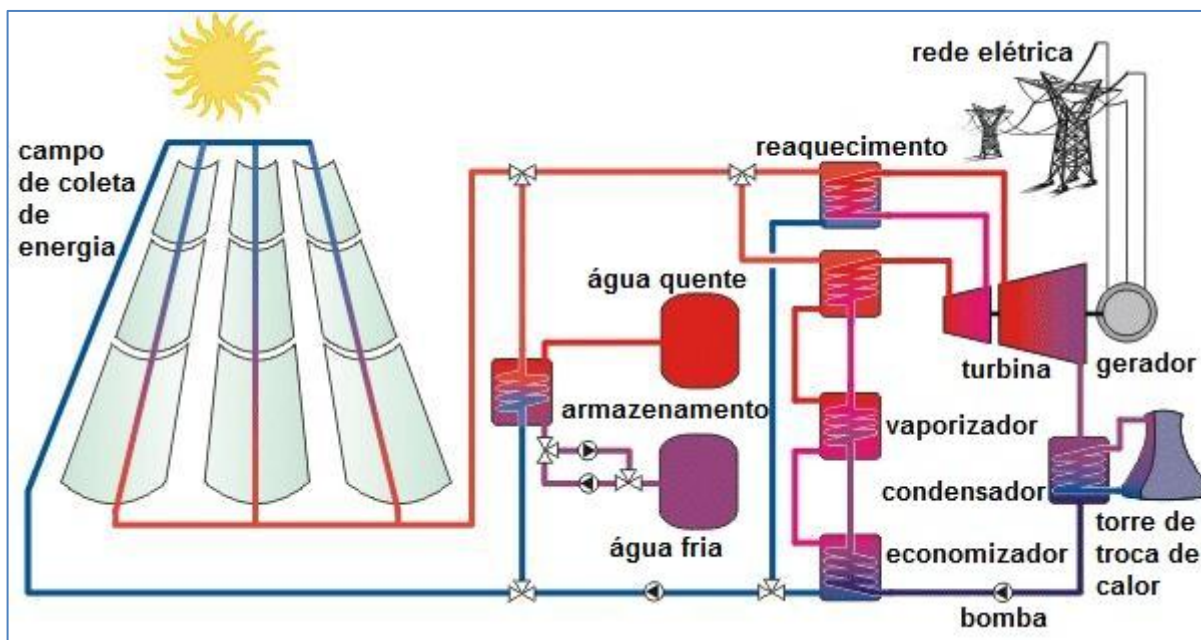


Figura 8 - Conversão de energia solar térmica

Fonte: Volker Quaschnig [19]

3.3.2 Energia geotérmica

A energia geotérmica pode ser utilizada para geração de energia elétrica. Por fornecer calor, como a energia solar térmica, o seu aproveitamento deve também ser feito através da geração de vapor para utilização em grupo turbina gerador. A Figura 9 mostra o esquema de uma usina geotérmica.

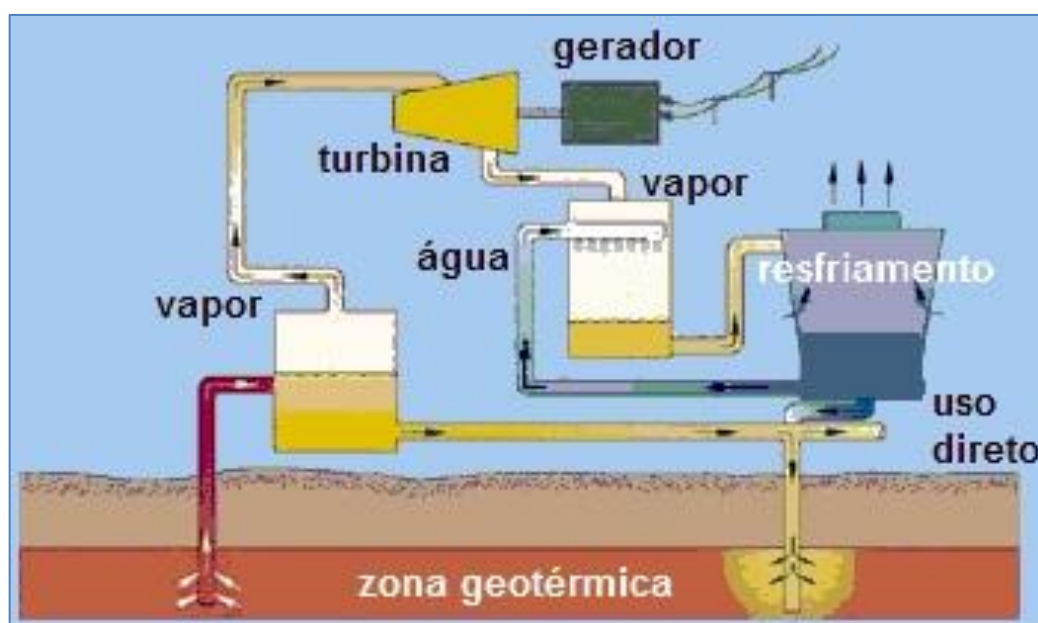


Figura 9 - Usina geotérmica

Fonte: Ormat [20]

3.4 CONVERSÃO DA ENERGIA SOLAR – FOTOVOLTAICA

A energia do sol pode também ser diretamente utilizada para conversão em eletricidade. A tecnologia utilizada para a conversão direta de energia do sol é a fotovoltaica. Os painéis fotovoltaicos são constituídos de diversas células fotovoltaicas, que são as responsáveis pela conversão da energia luminosa em energia elétrica. O processo envolve a emissão de elétrons quando a luz incide na superfície do metal, e então o fluxo de elétrons é direcionado, o que constitui a corrente elétrica. Este processo é conhecido como efeito fotoelétrico [21]. Os detalhes do painel e das células fotovoltaicas podem ser visualizados Figura 10.

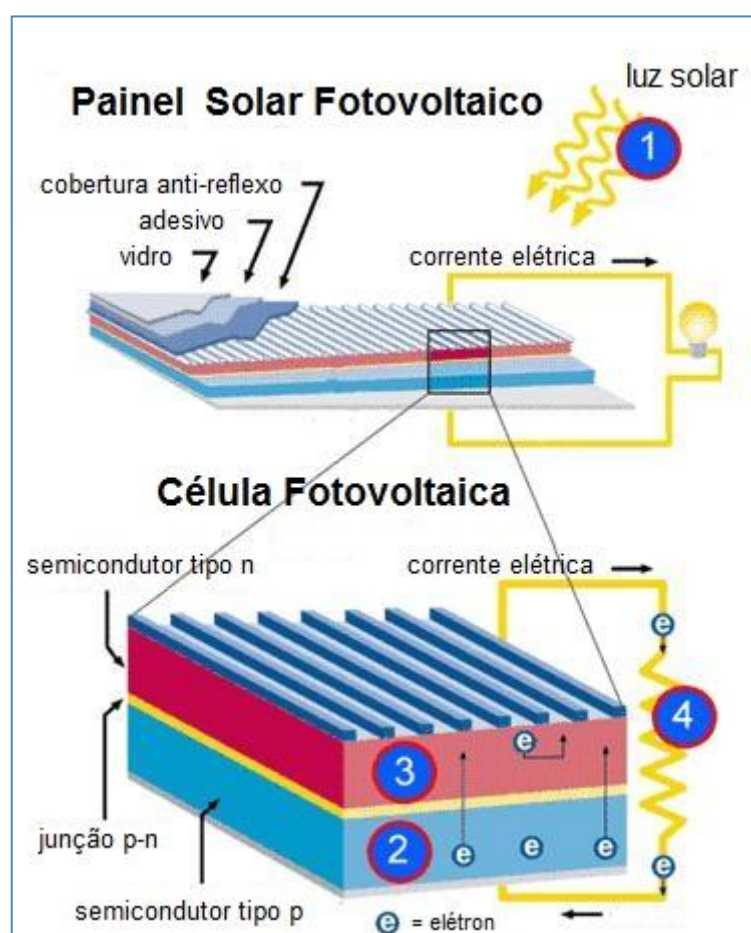


Figura 10 - Painel e célula fotovoltaica

Fonte: Solar Cell [21]

3.5 CONVERSÃO DA ENERGIA MECÂNICA – TRABALHO

Com exceção da energia química convertida pela tecnologia de conversão eletroquímica e da energia solar convertida pela tecnologia de conversão fotovoltaica, todas as fontes de energia fazem uso, na etapa final, da conversão

eletromecânica para alcançar como produto a eletricidade. O processo de conversão eletromecânica envolve a troca de energia entre um sistema mecânico e um sistema elétrico, através de um campo de acoplamento, que pode ser de origem elétrica ou magnética [22].

Dentre as fontes de energia da natureza que fornecem diretamente energia na forma mecânica estão:

A. Energia eólica

A força dos ventos normalmente utilizada para mover as pás de um gerador eólico, como o próprio nome diz, um gerador de eletricidade a partir da força mecânica dos ventos. Na Figura 11 pode-se visualizar a estrutura interna de um aero gerador. O vento move as pás, que conectadas ao eixo, transmitem a energia mecânica. No gerador descrito abaixo há uma caixa de marchas que converte o movimento mecânico de baixa velocidade em movimento de alta velocidade, e este aciona então o gerador. Mas essa configuração nem sempre se faz necessária, existem geradores que utilizam transmissão direta.

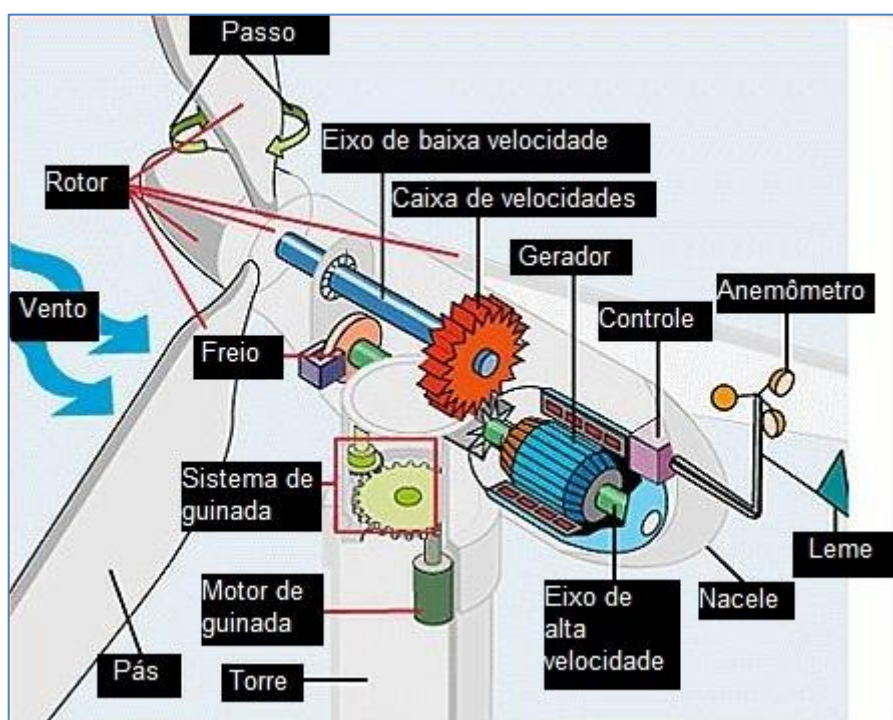


Figura 11 - Gerador eólico

Fonte: NREL [23]

B. Energia hidráulica

A energia hidráulica utiliza a força do movimento das águas para conversão eletromecânica de energia. Neste contexto estão inseridas tecnologias que fazem uso das ondas do mar, e também das marés, que ainda se encontram em fase de desenvolvimento e testes, mas que demonstram um potencial energético considerável, necessitando de melhorias para que se tornem comercialmente maduras. Mais consolidada está a tecnologia de centrais hidroelétricas que faz uso das águas dos rios, tanto em represas quanto em instalações que aproveitam diretamente o fluxo contínuo da água. Como se pode verificar na Figura 12, em alguns tipos de usina hidroelétrica a água é represada. O projeto do duto de passagem da água favorece o ganho de velocidade no caminho entre o reservatório e a turbina. Quando alcança a turbina, o fluxo da água tem energia suficiente para movê-la, possibilitando assim a conversão eletromecânica de energia.

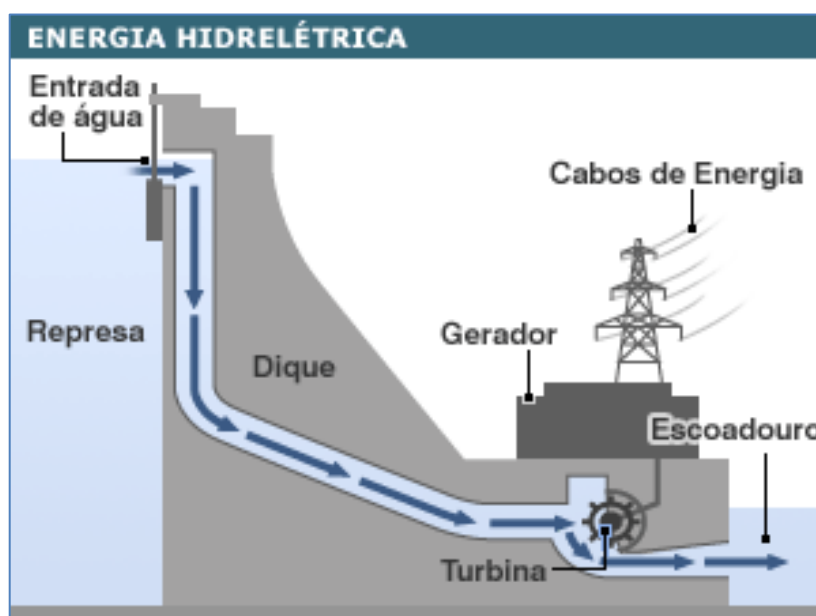


Figura 12 - Usina hidroelétrica

Fonte: BBC Brasil [24]

Na Tabela 1 estão relacionadas às fontes de energia com as formas de energia diretamente produzidas pelas fontes, e ainda a escala atual da tecnologia de aproveitamento.

Tabela 1 - Fontes, energia diretamente convertidas e escala de aproveitamento

TIPO DE ENERGIA	ENERGIA DIRETAMENTE CONVERTIDA	ESCALA DE APROVEITAMENTO
Hidráulica (Rios)	Elétrica	Comercial
Geotérmica	Elétrica	Comercial
Eólica	Elétrica	Comercial
	Mecânica	Comercial
Solar Fotovoltaica	Elétrica	Comercial
Solar Térmica	Elétrica	Em desenvolvimento
	Térmica	Comercial
Biomassa	Elétrica	Comercial
	Térmica	Comercial
	Combustíveis	Comercial/Desenvolvimento
Oceanos/Marés	Elétrica	Marés: Comercial; Outras: em desenvolvimento

Neste capítulo a conversão de energia foi detalhada com ênfase na conversão em energia elétrica. Foram mostradas as tecnologias mais comuns, existentes atualmente, para a conversão das diversas formas de energia disponíveis na natureza, em energia útil. No capítulo seguinte, o panorama mundial e brasileiro, no que diz respeito às energias renováveis, será apresentado.

4 ENERGIAS RENOVÁVEIS – MUNDO E BRASIL

Atualmente, relacionado às questões de preservação ambiental e de desenvolvimento sustentável, existe significativo apelo social para que iniciativas tais como a redução da emissão de gases de efeito estufa, a preservação de rios e de lençóis freáticos tornem-se cuidados rotineiros e que sejam levados em consideração na avaliação de projetos que visam o desenvolvimento econômico.

Pensar a respeito de desenvolvimento sustentável está fortemente conectado à necessidade de que a energia utilizada pela sociedade seja provinda de recursos renováveis, ao invés de ter como fontes, recursos não-renováveis tais como combustíveis fósseis, por exemplo. Hoje em dia, em todo o mundo a maior parte da energia é provinda da queima de combustíveis fósseis, tanto para a produção de energia elétrica, quanto para uso na mobilidade. Mas este cenário deve mudar em um futuro próximo, devido ao aumento no preço do petróleo, em decorrência de uma prevista escassez, conforme mostra a Figura 13.

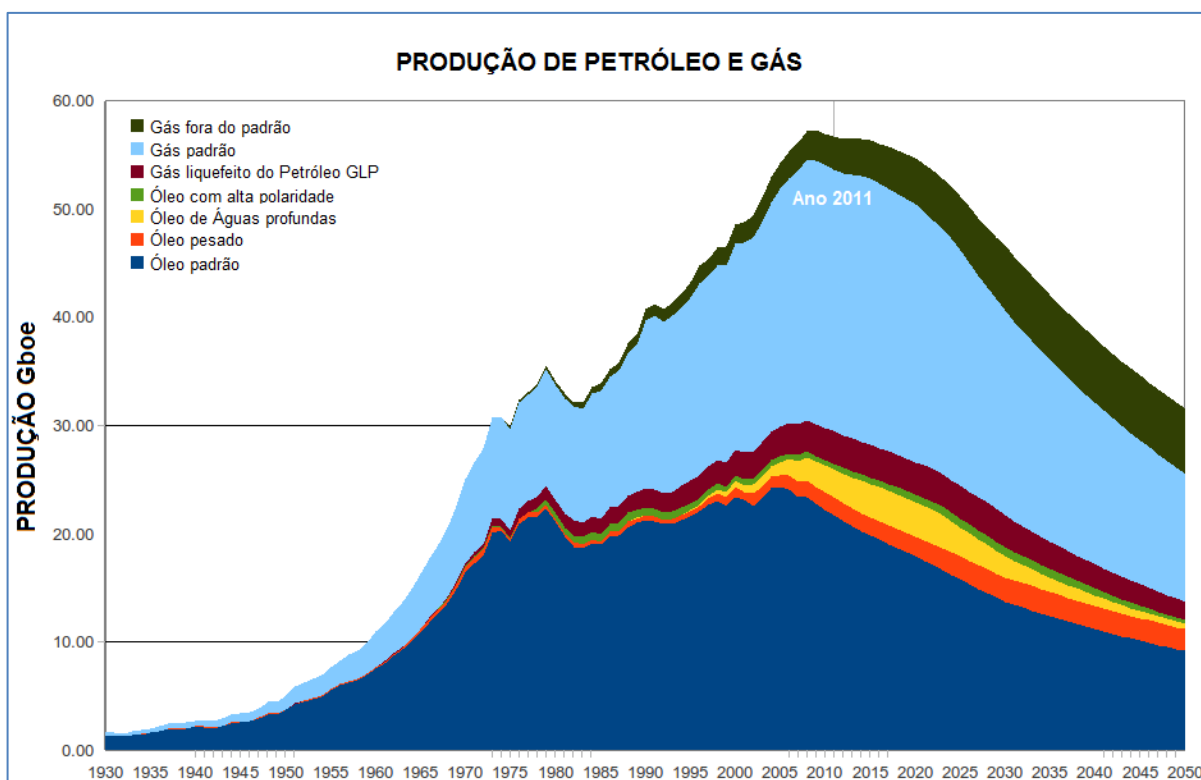


Figura 13 - Produção de petróleo e gás [1]

O gráfico da Figura 13 ilustra em uma linha do tempo, dados históricos de produção de petróleo em conjunto com a previsão de produção para os próximos anos, em bilhões de barris de petróleo equivalente (Gboe – *Giga barrels of oil*

equivalent). As informações de previsão são baseadas em estimativas estatísticas realizadas associando a descoberta de reservas de petróleo, com o tempo médio necessário para se extrair o recurso após o descobrimento da reserva [1].

Esta possível escassez de petróleo deve ainda incentivar que países desenvolvam tecnologias diferentes e específicas para serem aplicadas na conversão de recursos renováveis em energia elétrica, de acordo com suas condições climáticas, geográficas e disponibilidade de recursos.

Outro fato que pode ser considerado como um marco nessa transição para um aproveitamento preferencial de recursos renováveis é o acidente nuclear, ocorrido em março de 2011 em Fukushima, Japão. Desde então, a maior parte dos países desenvolvidos vem se abstendo de utilizar combustíveis nucleares como fonte de energia, inclusive iniciando planos de fechamento de usinas nucleares, como é o caso de Alemanha, Suíça e Bélgica [25] [26].

Com relação ao meio ambiente, é importante fazer uma análise dos fatos com base estatística e nas estimativas de temperaturas do passado e do futuro. O aumento da temperatura da biosfera terrestre vem sendo colocado em evidência nos últimos anos. Tal fato é mostrado na Figura 14, que mostra as medições de temperatura média para oceano e terra até 2011.

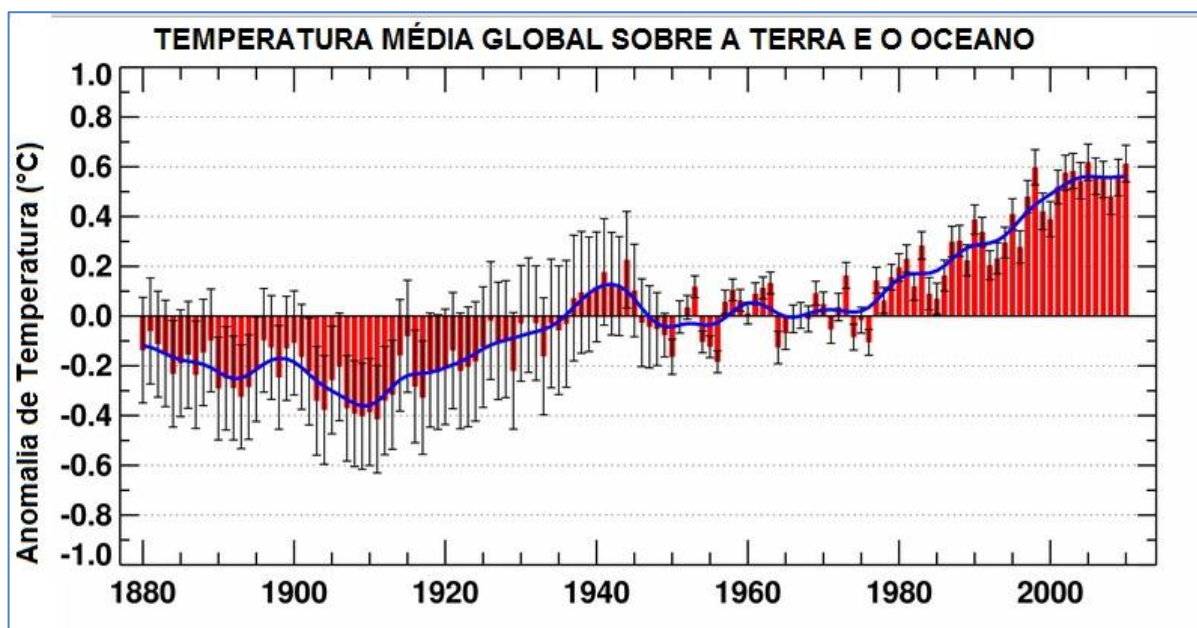


Figura 14 - Temperatura global

Fonte: NOAA [27]

Tais medições vêm sendo feitas desde meados do século XIX, na terra e no mar [27]. Para a maioria, o fato de a temperatura da terra estar se elevando segue apenas uma tendência natural, ou um ciclo pelo qual o planeta está passando [28]. Porém existem outras informações de certa relevância a serem avaliadas, como por exemplo, a coincidência do aumento da temperatura da terra com a elevação nos índices de emissões de gases poluentes, conforme mostrado na Figura 15.

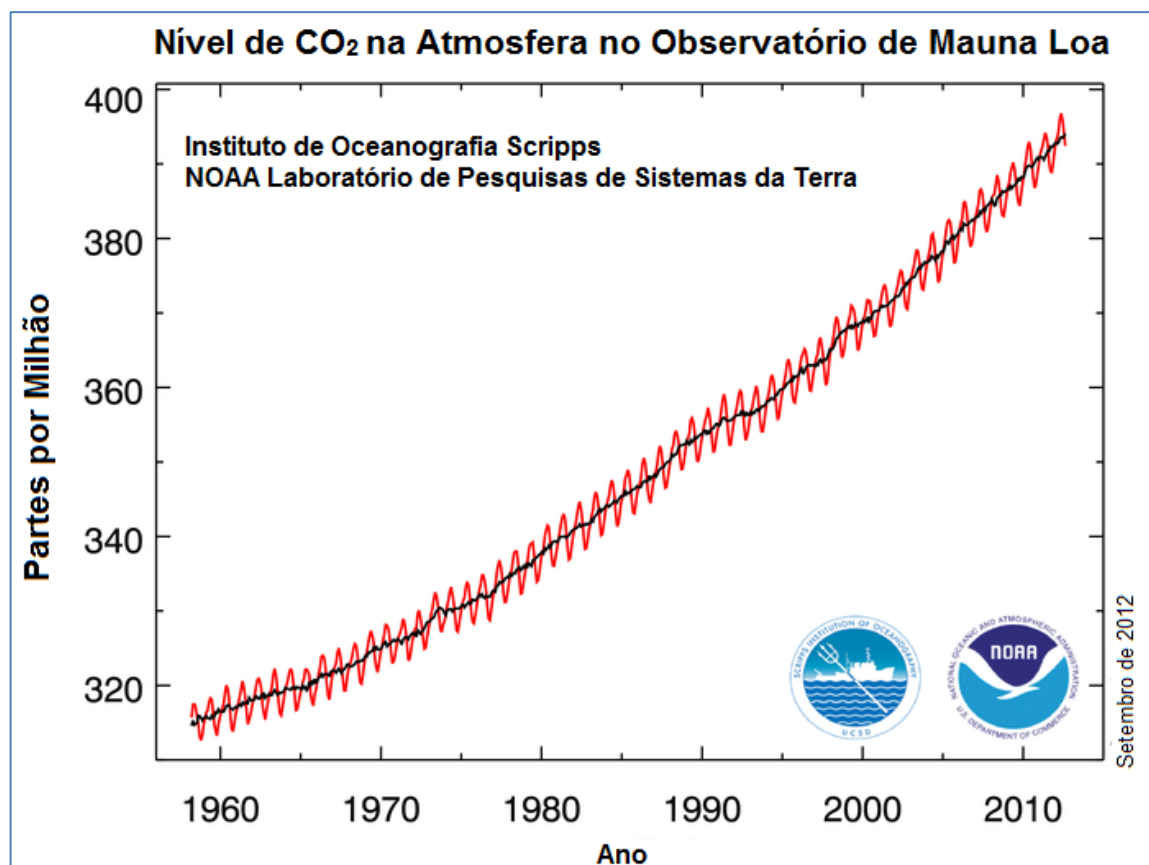


Figura 15 - Nível de CO₂ na Atmosfera

Fonte: ESRL-NOAA [29]

Comparando-se os gráficos das Figuras 14 e 15, nota-se que desde que as emissões de CO₂ vêm crescendo, devido às atividades industriais e do crescente número de veículos movidos a combustíveis derivados do petróleo, a temperatura média global do planeta também vem aumentando. Apesar da possibilidade deste fato ser apenas uma coincidência, algumas medidas já vêm sendo tomadas para que as emissões diminuam. Investimentos em tecnologia de aproveitamento de recursos renováveis estão em grande expansão no mundo todo, com ênfase para o continente europeu.

Ainda nesse contexto, com base na Figura 16, pode-se identificar que a projeção das emissões mostra um crescimento significativo para os próximos anos.

Caso o aumento das emissões cause uma elevação na temperatura da Terra, nessas condições, o modo de vida no planeta pode sofrer alterações relevantes.

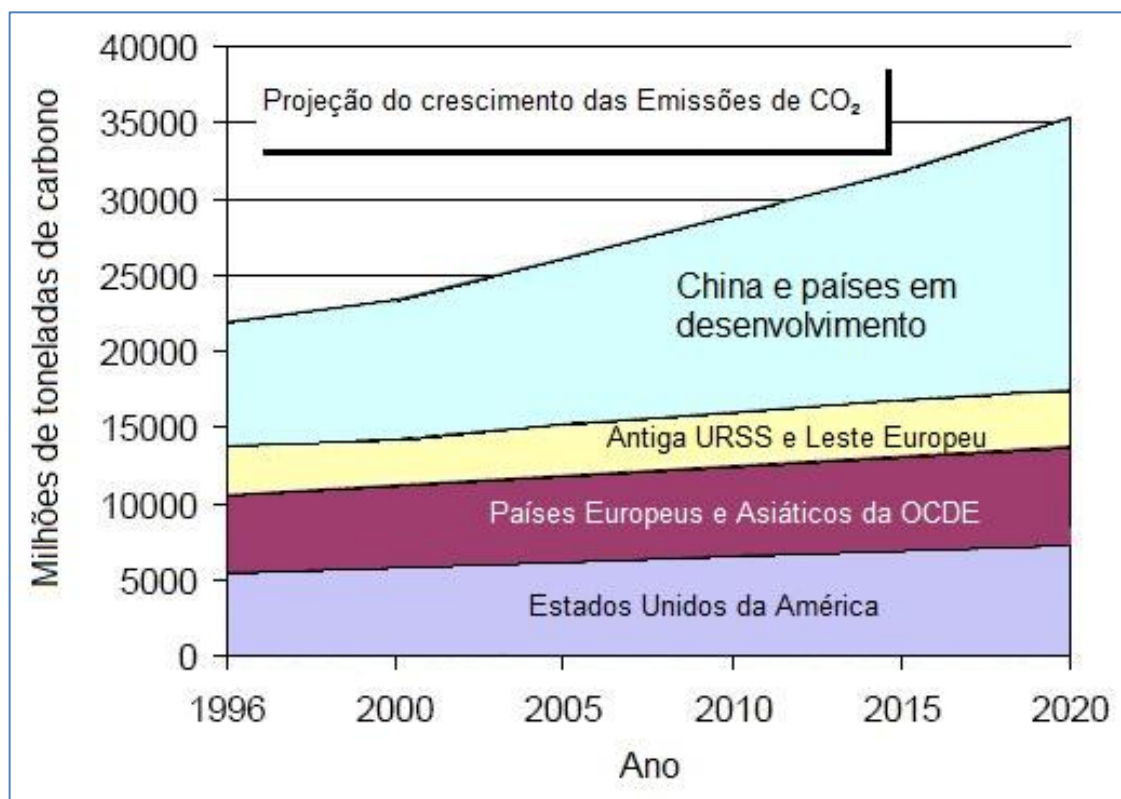


Figura 16 - Projeção do crescimento das emissões de CO₂

Fonte: *The Oil Drum* [30]

Dentre as consequências de uma possível elevação na temperatura da Biosfera estão:

- Aumento do nível do mar;
- Alteração no suprimento de água doce;
- Maior número de ciclones;
- Tempestades mais fortes e mais frequentes;
- Forte e rápido ressecamento do solo;
- Alteração na distribuição de chuvas.

Já no cenário brasileiro, onde as fartas bacias hidrográficas permitem uma considerável expansão de investimentos em geração hidrelétrica, existe uma natural oposição à ideia de se investir em tecnologias alternativas, por parte dos mais conservadores. O que não se analisa quando se fazem essas manifestações contrárias, é que existem outros benefícios inclusos no uso dessas tecnologias, além

da maior oferta de energia elétrica na rede. Por serem os recursos renováveis, em sua maioria, de natureza mais distribuída, tecnologias de conversão que utilizam esses recursos tendem a tornar a oferta de energia elétrica, por consequência, mais distribuída, ao contrário do modelo mais comum nos dias atuais que é composto por grandes centrais geradoras e longas linhas de transmissão. Um fato interessante é que um modelo composto por pequenas centrais hidrelétricas (PCHs) se encaixa no modelo de geração distribuída mencionado. Esta característica do modelo faz com que a rede elétrica seja capaz de fornecer maior qualidade de energia em regiões remotas e pontos críticos de distribuição. Além disso, existe o fato de que uma matriz energética mais diversa pode ser capaz de manter a segurança no suprimento energético do país, visto que dessa forma não depende apenas de um único recurso natural, embora renovável como o hidráulico.

4.1 SUPRIMENTO ENERGÉTICO

Nesta seção é feita uma classificação das fontes de recursos energéticos, sendo separadas em fontes primárias e fontes secundárias.

4.1.1 Fontes primárias de energia

Em geral, fontes primárias de energia são:

A. Fontes fósseis de energia

- Carvão
- Petróleo
- Gás natural
- Óleo de xisto
- Areia betuminosa
- Hidratos gasosos

B. Fontes renováveis de energia

- Água
- Sol
- Vento
- Aquecimento geotérmico

- Ondas e marés
- Biomassa

C. Combustíveis nucleares

4.1.2 Fontes secundárias

Fonte secundária de energia é derivada da transformação de uma fonte primária de energia, em um produto de qualidade superior, depois de passar por alguns processos como fermentação e tratamento térmico, por exemplo. Basicamente as fontes secundárias de energia são:

A. Produtos derivados de carvão

- Coque
- Briquetes

B. Produtos derivados de petróleo

- Combustíveis como gasolina, diesel, e gás
- Óleo combustível
- Gás liquefeito do petróleo (GLP)
- Gás de refinaria

C. Produtos derivados de fontes renováveis

- Biogás
- Gás de aterro
- Gás de síntese
- Bio-óleos

4.2 COMPARATIVOS ENTRE FONTES RENOVÁVEIS E NÃO-RENOVÁVEIS

Existem algumas diferenças relativamente importantes entre as fontes de energia renováveis e as não-renováveis, levando em consideração alguns aspectos como, por exemplo, a disponibilidade na natureza, a relação com o poder, o

desenvolvimento tecnológico, dentre outros. Essa diferenciação é feita nas seções seguintes.

4.2.1 Fontes de energia e disponibilidade na natureza

A relação de disponibilidade na natureza é avaliada nesta seção, tomando como referência a forma como as fontes estão distribuídas no planeta. As fontes não-renováveis, como é o caso dos combustíveis fósseis, aparecem na natureza em forma de depósitos. Esses depósitos têm sua distribuição concentrada em alguns pontos do planeta, como é o caso do Oriente Médio, que concentra grande parte das reservas de petróleo mundial [32]. Por estarem concentradas, essas fontes possibilitam uma extração relativamente fácil do recurso energético. Outra característica relevante é a facilidade de transporte que esses recursos têm, relacionada à forma como os recursos são aproveitados e também ao seu conteúdo energético elevado. No caso do petróleo pode ser transportado em reservatórios ou por dutos. O gás natural geralmente é transportado por gasodutos, exemplos são os gasodutos Bolívia – Brasil [33] e Rússia – Alemanha [34]. No caso do carvão, este se apresenta em estado sólido, sendo então mais comumente transportado por trens, navios e caminhões.

Já as fontes renováveis estão mais bem distribuídas na natureza como, por exemplo, as energias solar e eólica, que estão presentes em todas as regiões do planeta, tendo assim potencial para aproveitamento. Devido à característica de se encontrarem distribuídas, em alguns casos, seu uso exige um armazenamento do recurso para uso posterior em quantidade adequada. Um exemplo que comprova esta característica é evidenciado nas barragens de algumas usinas hidrelétricas, onde a água é represada, quando o rio não tem um fluxo suficiente, para que possa então, em quantidade adequada, mover as turbinas por um período considerável. Dessa forma, o reservatório de água tem uma energia potencial armazenada. Porém existem usinas que não utilizam reservatórios como é o caso das usinas a fio d'água. Outra característica de algumas fontes renováveis é a dificuldade de transporte de seu produto, pois geralmente seu aproveitamento é feito convertendo-se diretamente o recurso em energia elétrica. Portanto, em razão de perdas consideráveis e dos custos para a manutenção de sistemas de transmissão, a energia elétrica não pode ser transmitida por distâncias muito longas, por exemplo, por distâncias intercontinentais. Nesse caso a utilização da energia seguindo este

modelo torna-se inviável. Sendo assim, a energia precisa ser aproveitada em uma região relativamente próxima, ou idealmente no local onde é gerada.

4.2.2 Relação das Fontes de Energia com o Poder

É inegável que a disponibilidade de recursos energéticos representa para um país mais possibilidades de crescimento econômico e de influência sobre o mercado de energia, de combustíveis e de outros subprodutos. Embora essas possibilidades não se concretizem em muitos casos. As reservas de recursos não-renováveis, por estarem presentes na natureza de forma mais concentrada, tornam algumas regiões do planeta, de certa forma, privilegiadas em relação a outras. O domínio dessas fontes de recursos energéticos vem sendo ao longo da história motivo de invasões de territórios e guerras. A considerável influência no rumo da indústria mundial, devido a uma grande oferta de petróleo foi sempre evidenciada, principalmente na indústria automobilística e de transportes. Essa influência vem sendo visualizada principalmente na tecnologia aplicada a seus produtos. Outra característica que pode ser evidenciada é a facilidade de controle dos preços, também devido ao fato de que a maior parte dos recursos está concentrada em poucos países, como é o caso dos países que fazem parte da Organização dos Países Exportadores de Petróleo, OPEP [35], que acabam formando um monopólio energético.

4.2.3 Fontes Alternativas, Convencionais e em Transição

Conforme definido no Capítulo 2, a classificação das fontes quanto à presença em uma matriz energética, obviamente, deve ser feita individualmente para um país ou região. Sendo assim, a definição feita neste caso é para o Brasil, e ainda dividida de acordo com a característica da fonte de ser renovável ou não.

4.2.3.1 Convencionais

I. Renováveis

- Hidráulica
- Biomassa: Etanol de cana-de-açúcar, lenha e carvão vegetal

II. Não-renováveis

- Petróleo

- Carvão
- Gás natural
- Fissão nuclear

4.2.3.2 Alternativas

I. Renováveis

- Geotérmica
- Solar
- Oceanos e marés
- Biomassa: Biogás e gaseificação.

II. Não-Renováveis

- Xisto
- Turfa
- Fusão nuclear

4.2.3.3 Fontes em Transição

I. Renováveis

- Eólica
- Biomassa: Biodiesel

4.2.4 Fontes e desenvolvimento tecnológico

Em geral, as fontes de energia não-renováveis apresentam um desenvolvimento tecnológico já consolidado, com pouco avanço da tecnologia ocorrendo nos dias atuais, devido ao fato de seu uso já estar estabelecido há várias décadas. Já as tecnologias de conversão de recursos renováveis em energia elétrica têm, em sua maioria, um desenvolvimento recente e necessitando de avanços nas tecnologias aplicadas. Boa parte dessas tecnologias ainda é cara, devido a não ser tão difundida quanto às tecnologias de aproveitamento de combustíveis fósseis. No entanto, por antecedência, alguns países já vêm investindo no desenvolvimento de algumas dessas tecnologias. Esses países, em sua maioria, não produzem ou têm

pouca oferta de petróleo, sendo que assim se depararam com a necessidade de buscar fontes alternativas de energia, antes que outros países.

4.2.5 Fontes e formas de geração

A princípio, pode-se fazer a classificação da forma de geração conforme a utilização dos recursos energéticos. As fontes de geração centralizada geralmente são de poder de geração mais elevado, como é o caso de centrais termelétricas e de algumas hidrelétricas. Geralmente essas usinas são projetadas para suprir a demanda energética de parte considerável ou total de uma região. Normalmente, utilizam como fonte carvão, gás natural, óleo combustível, combustível nuclear, biomassa e também energia hidráulica. As usinas mencionadas constituem uma forma de geração mais concentrada, fazendo uso de grandes quantidades de recursos e gerando quantidades consideráveis de energia elétrica e/ou térmica. Com isso, é possível alcançar menores custos de produção e maior controle e ajuste de demanda. Por outro lado, existe a necessidade de rede de transmissão da energia, e conseqüentemente a ocorrência de maiores impactos ambientais locais e na transmissão.

Devido à característica mais distribuída das fontes renováveis, a utilização desses recursos geralmente se faz também de forma distribuída. A contribuição identificada por essa característica, inerente aos recursos renováveis, é que ao fazer uma maior utilização desses recursos, o investimento em infraestrutura para transmissão da energia gerada pode ser reduzida. Além disso, existe um abastecimento mais uniforme pela distribuição das usinas de geração e do aumento da segurança no suprimento energético, por depender assim de mais fontes de recursos.

4.2.6 Fontes e a sociedade

Há também a influência na sociedade da forma como as questões relacionadas à energia são geridas. No caso de um modelo de geração centralizada, geralmente os proprietários de empreendimentos são grandes grupos econômicos ou o Estado. Esta característica facilita o controle de preços devido à pouca concorrência no mercado. O que também fica evidente é a influência quase desprezível que o consumidor exerce no mercado de energia, em decorrência dos monopólios existentes no modelo atual.

Já no caso do modelo de geração descentralizada, existe a possibilidade de uma participação maior de pequenos grupos econômicos no mercado de energia. Também é possível uma maior competitividade em todos os segmentos da cadeia, levando ainda a uma capacidade maior de negociação de preços.

No capítulo seguinte serão apresentadas informações a respeito do potencial energético brasileiro. Ainda, uma abordagem regional do estado de Santa Catarina e da região do Médio Vale do Itajaí são ilustradas.

5 CENÁRIOS BRASILEIRO, CATARINENSE E DO MÉDIO VALE DO ITAJAÍ

Uma análise sobre o potencial brasileiro, assim como o catarinense e o da região de Blumenau, para a utilização de recursos renováveis, com ênfase na conversão para energia elétrica, é feita neste capítulo. Além disso, uma abordagem voltada para as questões socioeconômicas está inserida nos temas seguintes. Da mesma forma, a realidade atual brasileira, catarinense e da região de Blumenau, envolvendo as políticas públicas e ações voltadas para o desenvolvimento sustentável, também são analisadas.

5.1 ENERGIAS RENOVÁVEIS NO BRASIL

O Brasil é um país em desenvolvimento que vive atualmente uma expressiva expansão econômica. Parte, ou grande parte, desse desenvolvimento se deve ao fato de ser um país privilegiado em termos de recursos naturais. Neste cenário de relativamente forte crescimento de atividades agrícolas, industriais e comerciais, a demanda por energia é crescente. Sendo assim, surge a necessidade de investimentos na área de suprimento energético.

Uma característica interessante da matriz energética brasileira é que aproximadamente 79 % da energia elétrica produzida no Brasil são oriundos da utilização de fontes renováveis. Sendo o recurso mais significativamente aproveitado o hidráulico [36], que é representado por mais de 82 GW de capacidade instalada. Analisando a Tabela 2, pode-se identificar que a utilização de outras tecnologias de energia renovável é ainda pouco significativa em relação ao potencial do país; a capacidade instalada de usinas de biomassa e usinas eólicas soma pouco mais de 11 GW.

Fazendo um comparativo entre os cenários brasileiro e europeu, pode-se identificar que o Brasil, em termos de geração de energia limpa, encontra-se em uma situação privilegiada. A participação das renováveis na matriz energética do país tem números maiores que os dos países europeus. O Brasil conta com quase 80% de fontes renováveis em sua matriz energética (eletricidade), ao mesmo tempo em que a Europa tem como meta alcançar, até 2020, 20% de energias renováveis na matriz energética global do bloco, conforme as estratégias decididas na diretiva europeia em energias renováveis de 2008. Isso, além de um aumento de 20% na eficiência energética total [37]. No Brasil, por se contar com uma matriz energética

“limpa” comparada com a maioria dos outros países, pensa-se que não há muito a fazer em termos de investimentos em energia renovável. Porém devido ao potencial energético brasileiro, podem-se desenvolver mercados alternativos contribuindo para o desenvolvimento do país, não só devido a instalação de novas usinas de geração, mas também com a possibilidade de desenvolvimento de tecnologias de aproveitamento apropriadas para as condições do país, alavancando assim parcela da indústria que tem relação direta ou indireta com esse mercado.

Tabela 2 - Matriz energética brasileira – Energia Elétrica [36]

EMPREENDEMENTOS EM OPERAÇÃO							
TIPO		CAPACIDADE INSTALADA		%	TOTAL		%
		N.º DE USINAS	(kW)		N.º DE USINAS	(kW)	
Hidro		975	82.382.091	65,74	975	82.382.091	65,74
Gás	Natural	105	11.429.703	9,12	144	13.226.886	10,56
	Processo	39	1.797.183	1,43			
Petróleo	Óleo Diesel	907	3.165.710	2,53	941	7.102.021	5,67
	Óleo Residual	34	3.936.311	3,14			
Biomassa	Bagaço de Cana	348	7.267.988	5,8	431	8.998.637	7,18
	Licor Negro	14	1.245.198	0,99			
	Madeira	43	376.535	0,3			
	Biogás	18	76.308	0,06			
	Casca de Arroz	8	32.608	0,03			
Nuclear		2	2.007.000	1,6	2	2.007.000	1,6
Carvão Mineral	Carvão Mineral	10	1.944.054	1,55	10	1.944.054	1,55
Eólica		73	1.471.192	1,17	73	1.471.192	1,17
Importação	Paraguai		5.650.000	5,46		8.170.000	6,52
	Argentina		2.250.000	2,17			
	Venezuela		200.000	0,19			
	Uruguai		70.000	0,07			
TOTAL		2.586	125.307.726	100	2.586	125.307.726	100

Devido ao seu expressivo potencial para geração hidrelétrica, por muitos anos a diversificação da matriz energética brasileira não foi expandida como em muitos países [38]. No decorrer da última década foram evidenciadas mudanças na característica de investidores em geração de energia. O investimento na área de energias renováveis, que antes tinha participação majoritária de pequenos investidores, agora atrai investimentos de grandes grupos [39].

5.1.1 Análise do potencial energético brasileiro para a utilização de energias renováveis para a conversão em energia elétrica

5.1.1.1 Hidráulica

Conforme estudo realizado em 2003, o potencial hidrelétrico brasileiro foi estimado em uma capacidade total de instalação de cerca de 260 GW [40]. O valor deste potencial foi composto pela soma da parcela estimada (remanescente + individualizada) com a inventariada.

O potencial estimado é resultante da somatória dos estudos:

- De potencial remanescente;
- Individualizados.

A parcela inventariada inclui usinas em diferentes níveis de estudo, como:

- Apenas em inventário;
- Estudo de viabilidade;
- Com projeto básico;
- Em construção;
- Em operação – compõe a capacidade total instalada.

Do potencial hidrelétrico brasileiro estimado no estudo, apenas 68% havia sido inventariado. Entre as bacias com maior potencial destacam-se as do Rio Amazonas e do Rio Paraná, conforme mostrado na Figura 17. Na Tabela 3 estão listadas as bacias hidrográficas e seus respectivos potenciais. Importante notar que as bacias estão divididas em sub-bacias e que na Tabela 3, o código diz respeito ao primeiro número da sub-bacia, que vai de 1 a 88, e estes aparecem na Figura 17.

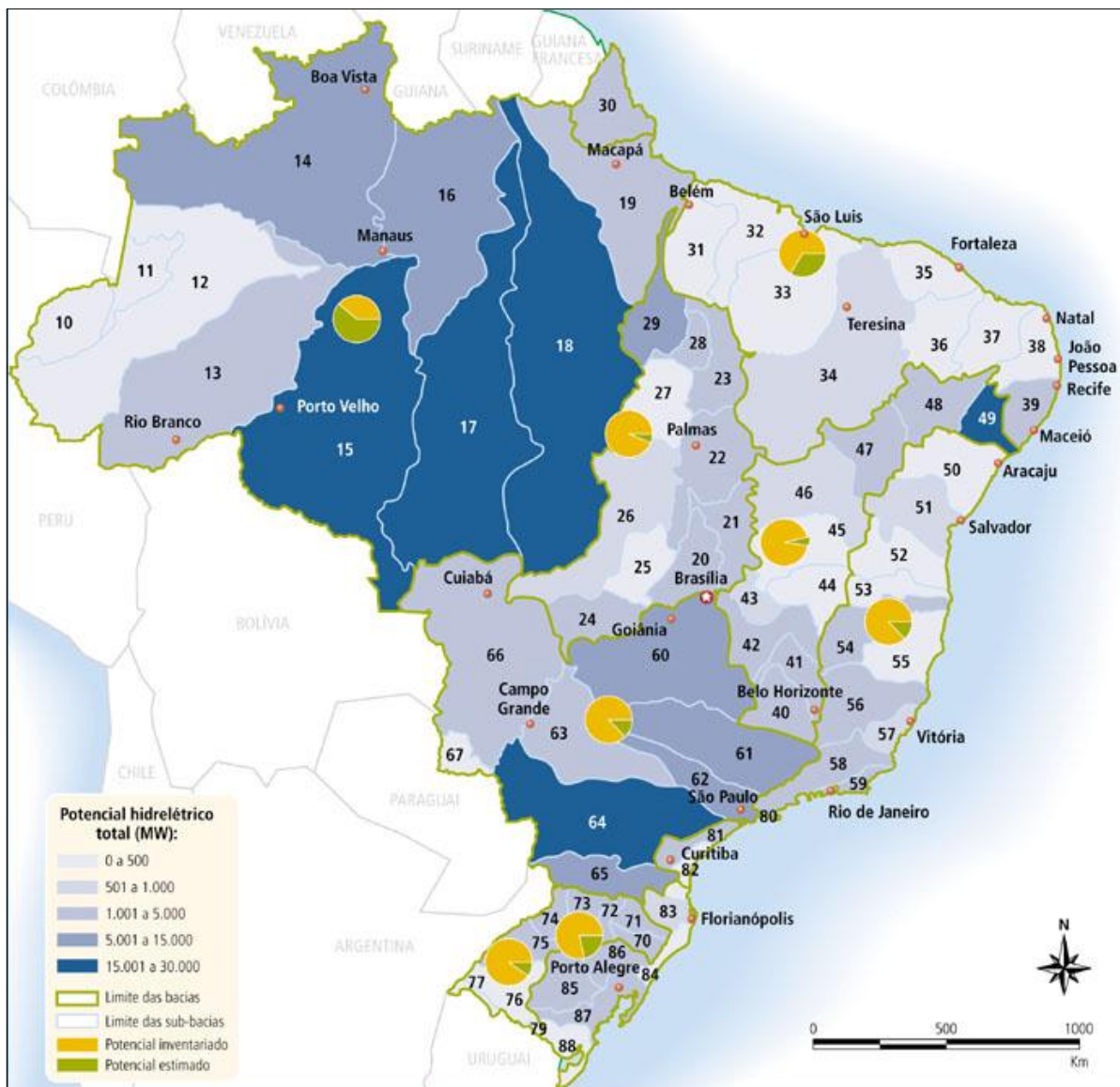


Figura 17 - Mapa do potencial hidrelétrico brasileiro

Fonte: SIPOT [40]

Tabela 3 - Potencial hidrelétrico brasileiro por bacias [40]

Bacia	Cód.	Estimado (MW)		Inventariado (MW)		Total (MW)	
		[a]		[b]		[a] + [b]	
Rio Amazonas	1	64164,49	78,84%	40883,07	23,04%	105047,6	40,59%
Rio Tocantins	2	2018,8	2,48%	24620,65	13,88%	26639,45	10,29%
Atlântico Norte/Nordeste	3	1070,5	1,32%	2127,85	1,20%	3198,35	1,24%
Rio São Francisco	4	1917,28	2,36%	24299,84	13,70%	26217,12	10,13%
Atlântico Leste	5	1779,2	2,19%	12759,81	7,19%	14539,01	5,62%
Rio Paraná	6	7119,29	8,75%	53783,42	30,31%	60902,71	23,53%
Rio Uruguai	7	1151,7	1,42%	11664,16	6,57%	12815,86	4,95%
Atlântico Sudeste	8	2169,16	2,67%	7296,77	4,11%	9465,93	3,66%
Total	-	81390,42	100%	177435,6	100,00%	258826	100,00%

5.1.1.2 Solar

Com maior parte do território situada entre o trópico de capricórnio e a linha do equador, o Brasil tem uma localização privilegiada em termos de insolação, pois a radiação solar direta, nas regiões equatoriais têm incidência maior que as outras regiões do planeta [41], conforme pode ser visualizado na Figura 18.

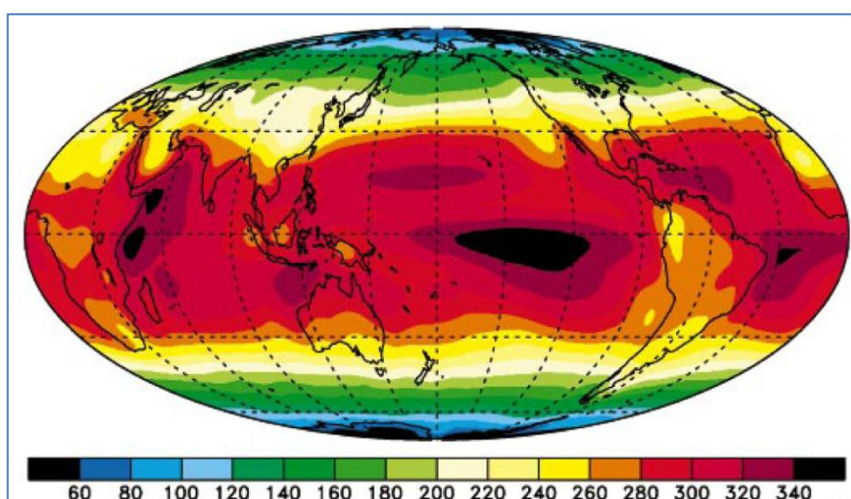


Figura 18 - Radiação solar média anual, absorvida pela Terra no topo da superfície em W/m^2 [41]

Além disso, como se pode verificar na Figura 19, a radiação solar direta no país têm, quase que para todo o território, níveis acima de $4,5 \text{ kWh}/m^2.\text{dia}$. Já o

potencial energético brasileiro, para aproveitamento fotovoltaico foi estimado em 15 MWp [42].

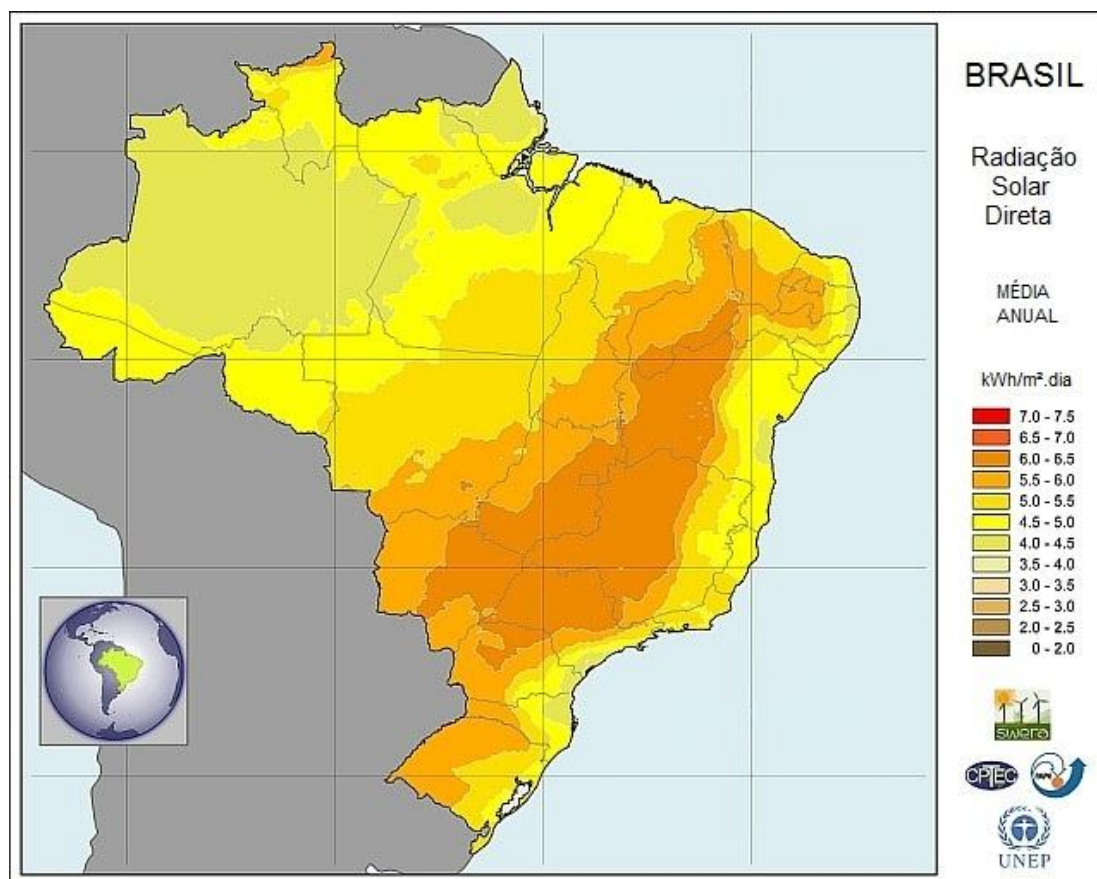


Figura 19 - Radiação solar direta anual

Fonte: Swera [43]

5.1.1.3 Eólica

Com base nas informações contidas no Atlas Eólico Brasileiro [44], pode-se analisar o potencial eólico do país. A estimativa é que a potência instalada pode ser da ordem de 143 GW, e a capacidade de geração aproximada de 272 TWh/ano. As áreas que contêm velocidades de ventos mais significativas para aproveitamento energético estão situadas na região Nordeste do país, como se pode ver na Figura 20.

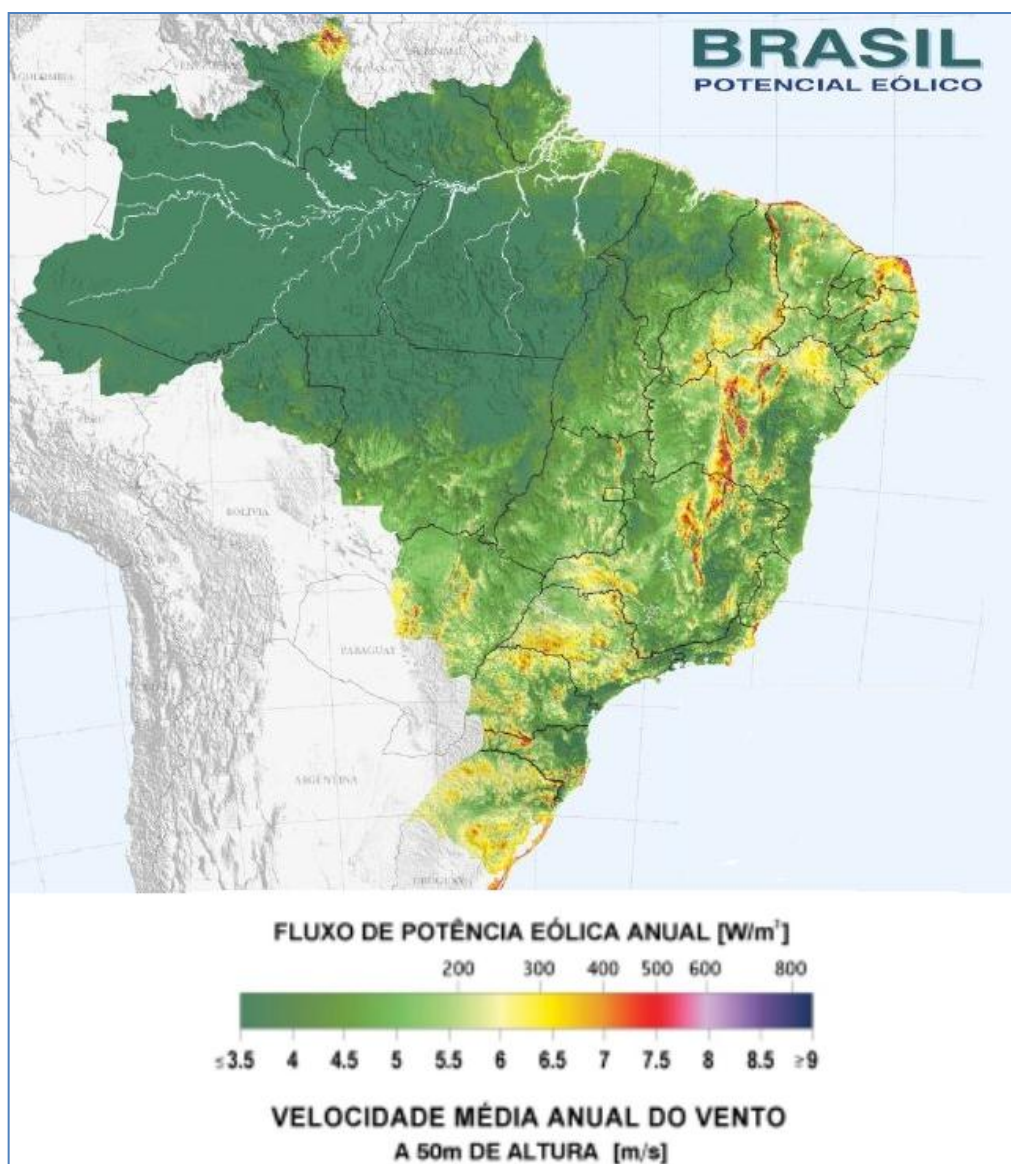


Figura 20 - Atlas eólico brasileiro

Fonte: CRESESB [44]

5.1.1.4 Biomassa

O potencial energético brasileiro com relação à biomassa é talvez o mais comum dentre as fontes de energia, juntamente com o potencial hidrelétrico. A diversidade de plantas existentes no país é resultado de quantidade abundante de água, insolação suficiente, e solo fértil. Destacam-se o potencial para a produção de etanol e biodiesel. O primeiro, no Brasil, produzido a partir da cana de açúcar, já o segundo oriundo de óleos vegetais como o de soja. Desde a década de 1970, o etanol vem sendo utilizado na mobilidade no país, tendo seu desenvolvimento impulsionado pela crise do petróleo daquela época [3]. No entanto houve um período em que o uso deste combustível diminuiu consideravelmente. Porém no final da década de 1990 a popularização do uso do etanol ocorreu devido à tecnologia de veículos bicomustível, dos quais diversos modelos podem utilizar gasolina e etanol em qualquer proporção de mistura.

5.1.2 Análise de políticas públicas e iniciativa privada, que influenciam o progresso da implantação das energias renováveis, no Brasil

5.1.2.1 Resolução ANEEL – consumidor pode repassar energia à rede

Desde o dia 19 de abril de 2012 estão em vigor novas diretrizes que foram aprovadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL). Uma mudança na lei brasileira parece começar a traçar um novo caminho. O consumidor que produzir energia de fontes renováveis em casa poderá injetar o excesso na rede da distribuidora local. As regras são válidas para micro geradores (até 100 kW) e mini geradores (de 100 kW a 1 MW) que convertem energia a partir de fontes renováveis como solar, eólica, hídrica ou biomassa. O retorno virá em crédito, que será abatido da conta de energia. Apesar de não haver pagamento de energia excedente injetada na rede, essa já é uma medida interessante que poderá ser adequada com o tempo [45].

5.1.2.2 Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS

Em 2010 foi instituída no Brasil a Política Nacional de Resíduos Sólidos [12]. Esse novo plano guia os objetivos, instrumentos, bem como as diretrizes relativas à gestão integrada e ao gerenciamento de resíduos sólidos. Também inclui os resíduos perigosos, a responsabilidade dos geradores e do poder público e aos

instrumentos econômicos aplicáveis. Alguns pontos importantes devem ser observados, tais como: responsabilidade compartilhada, gestão integrada de resíduos sólidos e incentivos à indústria de reciclagem.

Responsabilidade compartilhada pelo ciclo de vida dos produtos: a responsabilidade pela destinação correta dos resíduos é compartilhada em cadeia, desde a produção, passando pelo consumidor, até seu destino final. Todos os envolvidos nesse processo dividem a responsabilidade pelo ciclo de vida dos produtos. O cliente, portanto, após descartar os resíduos continua tendo a responsabilidade até que o ciclo de vida do produto se encerre.

Gestão integrada de resíduos sólidos: Com a intenção de encontrar uma solução para o problema da destinação correta dos resíduos sólidos, a gestão integrada de resíduos foi proposta através da PNRS. Esta é composta de uma série de ações com a finalidade de promover o desenvolvimento sustentável. A gestão integrada de resíduos sólidos é um sistema de cooperação entre o governo federal, estados, municípios e companhias privadas. Esse sistema pretende ter cooperação técnica e financeira para integrar a gestão de resíduos. Um plano local de gestão integrada está a cargo dos municípios. O governo federal oferece alguns incentivos como programas de financiamentos específicos para projetos na área. Esse crédito está preferencialmente disponível para os municípios que se encaixarem em algumas características, dessas destacam-se duas:

- Municípios que tiverem como opção soluções para a gestão de resíduos baseada em consórcio com outros municípios.
- Aqueles municípios que implantarem sistemas de coleta seletiva e incluam no projeto cooperativas de catadores.

Isso, além de incentivo à Indústria de Reciclagem e Integração dos Catadores em Projetos de Reciclagem.

5.2 ENERGIAS RENOVÁVEIS EM SANTA CATARINA

Assim como a realidade constatada para o cenário brasileiro, o potencial energético devido ao aproveitamento de recursos renováveis no estado de Santa Catarina também é expressivo. Com diferentes condições de clima e vegetação,

além das distintas atividades econômicas presentes no estado, percebe-se uma importante diversidade de recursos disponíveis, dadas as particularidades das regiões. O estado de Santa Catarina é subdividido em seis mesorregiões, como se pode verificar na Figura 21.



Figura 21 - Mesorregiões de Santa Catarina

Fonte: Instituto Cepa/SC [46]

As mesorregiões são:

1. Grande Florianópolis
2. Norte Catarinense
3. Oeste Catarinense
4. Serrana
5. Sul Catarinense
6. Vale do Itajaí

Assim como no restante do país, a energia hidrelétrica está consolidada como a principal forma de produção de energia elétrica, correspondendo a mais de 80% da energia elétrica gerada no estado, mas ainda assim o estado não é auto-suficiente na geração de energia elétrica. Porém, essa condição deve mudar em meados de 2015 quando o estado passará a produzir energia em quantidade superior à consumida. Alguns empreendimentos em construção e outros outorgados ampliam ainda mais a consolidação da energia hidrelétrica em Santa Catarina [47].

A maior parte das usinas está implantada nas bacias dos rios Pelotas e Uruguai. No entanto, a construção de mais barragens, com alagamento de grandes áreas não representa um modelo totalmente correto, do ponto de vista ambiental. Um exemplo de tecnologia diferenciada, que pode ser utilizada para aproveitamento de recurso hídrico sem tantos impactos, é a usina hidrelétrica Salto Pilão, localizada na região do Alto Vale do Rio Itajaí Açu, onde o desnível de 200 metros entre partes diferentes do mesmo rio foi utilizado, e um túnel desvia o curso da água, onde o aproveitamento acontece [48].

No que diz respeito à energia solar a região com níveis mais elevados de radiação solar direta é a região oeste. Nas outras regiões os níveis são mais baixos, mas ainda assim, são mais altos do que em países europeus onde as tecnologias de aproveitamento solar térmico e fotovoltaico são amplamente difundidas, como é o caso de países como Noruega, Dinamarca e Alemanha [49].

A energia eólica aparece no cenário catarinense em expansão, com alguns parques eólicos em funcionamento e outros em construção. As regiões do estado com maior potencial para uso da tecnologia são a região sul em locais próximos à cidade de Laguna, região serrana nas proximidades de Urubici e Bom Jardim da Serra, e também na região Oeste nos arredores do município de Água Doce [44], próximo da divisa com o estado do Paraná.

No cenário da biomassa, a diversidade das atividades econômicas do estado favorece a produção de quantidades consideráveis de material, com potencial para ser aproveitado em conversão energética. A região oeste se destaca pela agricultura e pela pecuária, no entanto contribuindo para que o estado seja responsável por mais de 20% da produção de carne suína [50] e mais de 15% da produção de carne de frango [51] do país, estão também as regiões sul e vale do Itajaí, o que resulta em uma quantidade relativamente grande de resíduos agrícolas, principalmente estercos e restos de cultura. Já na região serrana e norte catarinense a indústria madeireira prevalece, e dessa forma resíduos da produção de papel, celulose e madeira são abundantes. A região do Vale do Itajaí tem uma contribuição significativa com a produção de arroz, da qual a casca é um resíduo com poder calorífico considerável [52].

Além dessas características, no estado assim como no Brasil, não são comuns sistemas de gestão de resíduos com aproveitamento energético. Esses recursos energéticos estão disponíveis em todas as cidades e existem tecnologias

apropriadas para cada caso. Essa prática pode se tornar viável em quase todas as regiões, desde que os fatores decisivos para a viabilidade de projetos dessa natureza sejam tratados de forma específica, como mostrado no Capítulo 6 deste trabalho.

5.3 ENERGIAS RENOVÁVEIS NO MÉDIO VALE DO ITAJAÍ

Blumenau está localizada na região no médio vale do rio Itajaí-Açu. A população da cidade chegou aos 309.204 habitantes na contagem feita no CENSO 2010 pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) [53]. Segundo o mesmo instituto a área da unidade territorial é de 519,835 Km². Sua economia está basicamente estabelecida em torno de serviços, turismo, e indústria, com destaque para a indústria têxtil.

A análise do potencial da região para energias renováveis pode ser feita com base nas seções anteriores. A região tem índices abaixo da média do estado para insolação e para ventos, porém a bacia do rio Itajaí Açu representa a maior vertente atlântica de Santa Catarina, tendo potencial significativo para a geração hidrelétrica [40] [43] [44]. Com relação à biomassa, na seção anterior foi destacada no vale a produção de arroz e a pecuária. Na região de Blumenau, apesar de em menor número, essas atividades também estão presentes, o que indica a presença de biomassa como restos de cultura e esterco para aproveitamento energético na região.

O que se pode identificar é que, apesar de estarem em queda, os custos das tecnologias solar e eólica no Brasil ainda são elevados [54]. Somando-se a isso o fato de que os índices de radiação solar direta e média anual de ventos na região de Blumenau são mais baixos que os valores médios do estado, considera-se como opção de investimento local, em tecnologia alternativa de aproveitamento de energia renovável, a recuperação energética dos resíduos, visto que a energia convertida não é o único benefício com a aplicação da ideia, como será detalhado no Capítulo 6. Sendo assim, como resultado das análises anteriores, as tecnologias de WTE se mostram com possibilidades relativamente interessantes de implantação na região do Médio Vale do Itajaí.

6 RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA ATRAVÉS DA GESTÃO DE RESÍDUOS – WASTE-TO-ENERGY (WTE)

6.1 VISÃO GERAL E STATUS

A tecnologia de recuperação da energia contida em resíduos, *waste-to-energy*, WTE, converte a energia química armazenada nos resíduos, em calor, vapor e eletricidade. Fontes primárias de combustível incluem RSU, e outros materiais oriundos de estações de descarte, assim como biogás e gás de aterro. Dentre as diversas tecnologias de processamento de combustível e conversão de energia, estão comercialmente consolidadas e em uso pelo mundo, a incineração de RSU e combustíveis derivados, bem como sistemas baseados em combustão que queimam gases resultantes de decomposição anaeróbica não controlada, em aterros sanitários, e também, gases provindos de digestores apropriados, biogás, onde o processo ocorre de forma controlada. Tecnologias de conversão térmica avançada como a pirólise – que transforma RSU em combustíveis mais versáteis, que podem ser usados para conversão energética com eficiências mais elevadas do que os sistemas convencionais – têm encontrado crescentes aplicações, porém ainda não estão consolidadas para este fim.

Tecnologias de WTE são amplamente reconhecidas, mundo afora, por agências governamentais, como soluções efetivas para gestão de recursos e também para a conversão energética através do uso de recursos renováveis. Quando incorporadas a planos de gestão de RSU, enfatizando redução, reutilização, reciclagem e compostagem, promovem a ideia de recuperação energética feita através do fluxo normal de resíduos, reduzindo ainda o volume, na ordem de 90%, do material que seria depositado em “lixões” ou aterros sanitários. Se aplicadas em aterros sanitários, instalações agrícolas e em plantas de tratamento de águas residuais e esgoto, podem fornecer energia útil, enquanto substancialmente reduzem as emissões de metano, um gás responsável pelo efeito estufa. Ainda o uso dessas tecnologias acaba por evitar que combustíveis fósseis sejam utilizados, e em aplicações conectadas à rede, supre consideravelmente energia através do uso de recursos domésticos e amplamente disponíveis, que são pelo menos parcialmente derivados de materiais biológicos. Tecnologias avançadas de processamento de resíduos, controle ambiental e sistemas de recuperação de materiais mantêm emissões de poluentes abaixo de limites regulatórios, aumentam

as taxas de reciclagem e possibilitam a formação de subprodutos com características apropriadas para seu reuso. Nos últimos anos houve uma significativa expansão na utilização de tecnologias de WTE em todo o mundo, impulsionada por incentivos políticos. Primeiramente e mais importante, muitos países deixaram de investir em aterros sanitários, considerando-os como ineficientes e ambientalmente inapropriados, levando assim a um aumento constante na quantidade de RSU destinada a recuperação energética. Já no Brasil a implantação de aterros sanitários está sendo implantada para a substituição dos lixões [55]. Por exemplo, uma diretiva de 1999 da União Europeia, banuiu a disposição em aterros, de frações de RSU com poder combustível, com o objetivo de controlar as emissões de metano, evitar uso improdutivo de terras e outros recursos, e prevenir a contaminação da água e do solo.

Na Europa, Ásia e outras regiões do planeta, políticas como essas – associadas à prevenção de mudanças climáticas e metas para uso de energias renováveis – tem motivado a construção de centenas de incineradores, a aplicação comercial pioneira de várias tecnologias avançadas de conversão térmica, e a multiplicação de unidades de utilização de gás de aterro e de outros sistemas que utilizam gases de digestão anaeróbica. Frequentemente essas plantas de WTE suprem energia térmica ou são de geração combinada de calor e eletricidade, sistemas CHP (*combined heat and power*) – para se ter uma ideia desta aplicação, 18% do aquecimento distrital da Dinamarca é abastecido pela combustão de RSU. Na Europa, as instalações que utilizam o tecnologia WTE forneceram 56 tera wattshora (TWh) de energia renovável em 2006 [56]. Já nos Estados Unidos da América (EUA), apesar do número de plantas ter estabilizado nos últimos anos, as unidades de WTE continuam a ser representativas no cenário de energias renováveis. E no Brasil essas unidades são raramente implantadas. A Figura 22 ilustra a geração de energia renovável não hidrelétricas dos EUA.

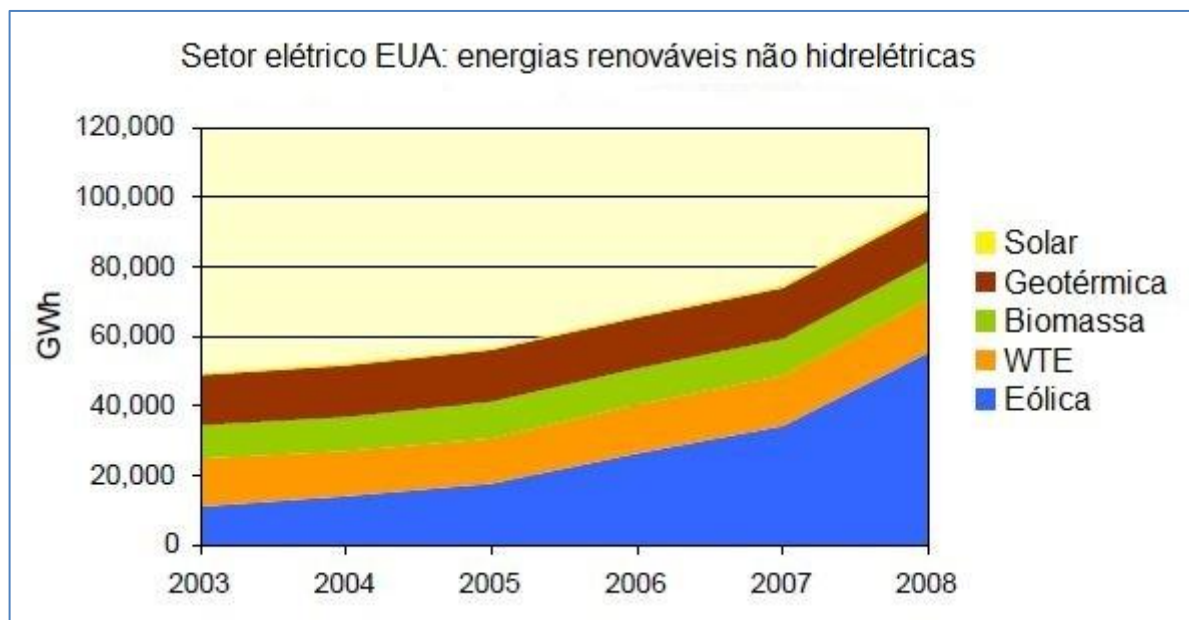


Figura 22 - Energias renováveis não hidrelétricas – Estados Unidos da América

Fonte: EPA [57]

A EIA - Administração de Informações sobre Energia, instituição que analisa informações sobre o setor energético daquele país, considera como energia verde, apenas a fração atribuída a fontes biogênicas. Na Figura 22 pode-se verificar que as tecnologias de WTE supriram 15,4 TWh de energia renovável à rede em 2008, equivalente a 16% da energia renovável não hidráulica, atrás apenas da energia eólica. Se contadas as unidades que utilizam como combustível, plásticos e outros materiais não biogênicos, a quantidade total de energia gerada passa dos 20 TWh no ano em análise [57].

Plantas convencionais de WTE são aplicadas tipicamente em estações centrais, para coletar RSU de uma determinada área, normalmente embasada em tecnologia de geração a partir de ciclos de vapor, e controles de poluição avançados. Estações que fazem uso de gases de digestão anaeróbica, ADTE (*anaerobic-digestion-to-energy*), tanto as que utilizam gás de aterro, quanto as que utilizam biogás de digestores controlados, têm seus recursos distribuídos e dessa forma utilizam os recursos no local, além de geralmente se apresentarem em menor porte e trabalhar com a disponibilidade de recurso local.

Como qualquer outra forma de geração de energia elétrica, a viabilidade econômica das tecnologias WTE depende amplamente da característica do combustível, dos custos de investimento, custos de operação e manutenção (O&M), condições de mercado e políticas associadas ao setor. Essas tecnologias são

consideradas uma alternativa para o descarte em “lixões” e aterros sanitários, e normalmente é necessário o pagamento de uma taxa, por parte dos municípios, para cada tonelada de resíduo pós-reciclagem depositada. Analisando-se os fatos citados, pode-se verificar um cenário de combustíveis a custo negativo – e uma fonte de receita – que ajuda a neutralizar os custos de implantação dos sistemas, associados ao manejo do combustível e aos sistemas de controle de poluição, também devido aos relativamente altos custos de O&M por se tratar de material com elevada umidade e teor de cinzas, considerável nível de contaminantes, e baixa densidade de energia, comparada a outros combustíveis. Usinas ADTE também requerem um suprimento constante de substratos a custo negativo ou zero, para justificar os gastos com a coleta, tratamento e sistemas de conversão.

A recuperação energética de RSU é mais cara do que a simples disposição em “lixões” ou aterros sanitários, devido a existir espaço suficiente em muitos países, como é o caso do Brasil, e também pelas taxas, cobradas por tonelada depositada nesses locais, serem razoáveis. No entanto, o descarte em aterros resulta em diversos impactos ambientais e a captura e queima do gás de aterro é uma forma ineficiente de geração de energia, quando se considera aterros com infraestrutura aplicada ao controle das emissões. Em comparação com a geração através do uso de combustíveis fósseis e outras fontes renováveis, plantas de RSU têm custo competitivo quando os custos de implantação e O&M, assim como as mais baixas eficiências de conversão são balanceados pelo custo negativo do combustível em conjunto com incentivos governamentais. A análise econômica é particular de cada projeto, com as peculiaridades de cada região, dependendo das taxas cobradas para a eliminação de resíduos em aterros sanitários, das características locais dos RSU, das normas ambientais, das práticas de gestão de subprodutos, e diversos outros fatores. Instalações de WTE geralmente se beneficiam de linhas de crédito, e taxas específicas que objetivam a ampliação de investimentos em energias renováveis. Porém em alguns casos as plantas de RSU não recebem esses benefícios total ou parcialmente, ou são preteridas, devido à parte significativa de sua energia ser produzida pela queima de plásticos e outros materiais não biogênicos. Já a análise econômica de instalações ADTE é, também, significativamente influenciada por gestores públicos. Políticas que requerem um controle de emissões de poluentes do ar e de gases de efeito estufa oriundos de aterros sanitários, de operações agrícolas, e de estações de tratamento águas

residuais e esgoto, tornam a avaliação econômica de projetos de implantação de usinas de ADTE favoráveis. Dependendo especificamente das circunstâncias de cada projeto, podem ser gerados fluxos de receitas adicionais por créditos de carbono além de vantagens publicitárias devido à obtenção de certificados de energia limpa.

Globalmente, mais de 1 bilhão de toneladas de RSU continuam sendo depositadas em aterros sanitários todo ano [57]. De acordo com análise realizada pela EPRI (*Electric Power Research Institute*) [58], as tecnologias WTE apresentam custo-benefício relativamente interessante, são soluções de curto prazo para a produção de energia, estão de acordo com metas internacionais para geração através de fontes renováveis, e contribuem na redução das emissões de gases do efeito estufa. Ainda, tecnologias avançadas de WTE oferecem a oportunidade de melhorias das práticas de gestão de recursos, melhorando a segurança energética, estão de acordo com políticas de cuidados ambientais, e podem dar suporte a políticas de metas para prevenção de mudanças climáticas em todo o mundo.

6.2 GESTÃO DE RECURSOS

Os resíduos diferem de outras fontes de energia no que diz respeito à sua disponibilidade depender de decisões e atividades de indivíduos, empresas, cidades e agências ao invés de indústrias de extração ou forças naturais. Particularmente, práticas de gestão de RSU, juntamente com o comportamento de produtores e consumidores, determinam o volume e a característica dos combustíveis apropriados para a conversão por tecnologias WTE. A Figura 23 mostra a hierarquia de gestão de resíduos sólidos, com a eficácia ambiental decrescendo de cima para baixo. Tradicionalmente, planos de gestão integrada de RSU focaram em redução, reutilização, reciclagem, e compostagem para diminuir o montante de material descartado via incineração ou disposição em aterros sanitários. Mais recentemente, estratégias de “resíduo zero” vieram à tona internacionalmente, enfatizando a prevenção e a recuperação de materiais, mas também focando na questão da recuperação energética como uma abordagem para garantir vantagens ambientais adicionais, incluindo a redução da utilização inapropriada de terra e emissões de poluentes.

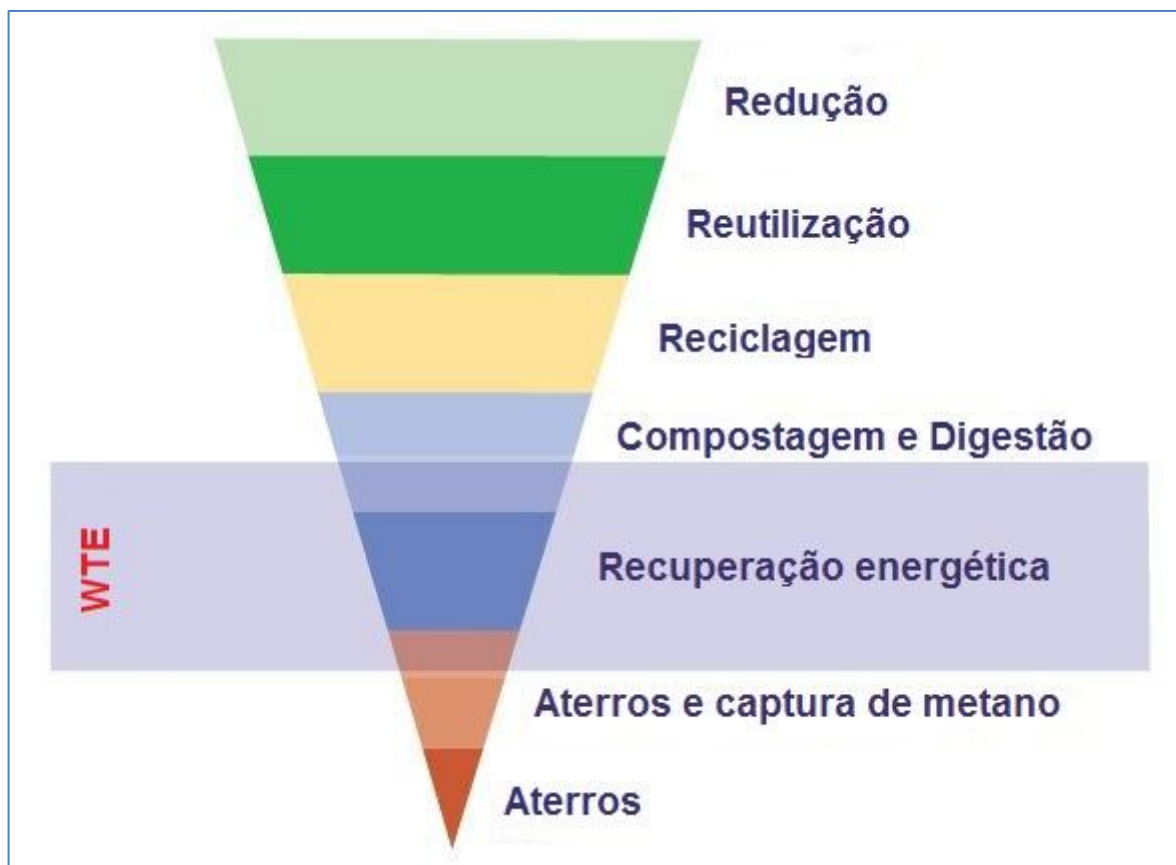


Figura 23 - Hierarquia da gestão de resíduos sólidos

Fonte: Powermag [58]

O relativamente pequeno impacto ambiental gerado por incineradores e outras plantas de WTE comparado ao gerado pela disposição de RSU em aterros sanitários, é um importante fator que pôde impulsionar a utilização em larga escala, para a eliminação de RSU em diversas cidades populosas de países europeus e asiáticos. Levando em consideração uma estimativa, uma planta com tempo de vida de 30 anos, capaz de processar 1 milhão de toneladas de RSU por ano, requer menos de 0,1 Km² de terra, enquanto que para aterrar 30 milhões de toneladas são necessários 3 Km². Ainda, após o término do tempo de vida, uma nova planta pode ser construída no local para continuar a processar RSU, enquanto que para aterrar mais RSU após o uso da capacidade total do aterro, é necessária a utilização de mais extensões de terra [59]. Embora hoje em dia existam aterros sanitários modernos, que são projetados para evitar infiltração de chorume no solo e vazamento de gás metano para a atmosfera, esses sistemas geralmente não funcionam perfeitamente. Um estudo mostra que aterros sanitários novos capturam em média 60% da emissão de gás metano [60]. Plantas de WTE evitam a produção indevida de metano e chorume, além disso, os gases de exaustão são submetidos a

rigorosos controles de qualidade do ar que minimizam as emissões de gases poluentes e componentes tóxicos como a dioxina e os furanos. Outra característica importante de ser salientada é que, quando a matéria orgânica, presente no fluxo de resíduos destinado a uma usina de tratamento, é considerada como neutra em carbono, a seguinte lógica é aplicada: as plantas utilizam o gás carbônico para a fotossíntese, sendo assim crescem e armazenam este gás em forma de biomassa. O carbono sólido é liberado via oxidação quando RSU biogênico é transformado em calor e energia elétrica. Este CO₂ retorna à atmosfera, mas apenas na quantidade equivalente aquela removida durante o processo de fotossíntese.

Queimar RSU possibilita a geração de energia e também vantagens na recuperação de materiais, evitando ainda que mais carbono seja emitido à atmosfera. Na média, quando se queima uma tonelada de RSU em uma usina de aproveitamento puramente elétrico, a quantidade de energia gerada para a rede é de aproximadamente 600 kWh [59]. Esse é um valor de magnitude maior que a quantidade associada com a disposição do mesmo montante de RSU em um aterro sanitário, considerando a utilização do gás gerado da decomposição anaeróbica do material aterrado, para conversão em eletricidade [61]. A recuperação energética de RSU é então capaz de substituir quantidades relativamente grandes de combustíveis fósseis, que seriam utilizados para conversão em energia útil além de proporcionar aumento na segurança energética e benefícios ambientais. Outras vantagens da utilização de tais tecnologias estão associadas a reduções adicionais de emissões devido ao fato de se separar metais dos resíduos que alimentam um sistema WTE e/ou da recuperação através de reciclagem de subprodutos da queima de RSU. Isso evita emissões de poluentes associadas à extração e ao processamento de materiais virgens.

De acordo com a análise do ciclo de vida dos resíduos, levando em conta a contribuição para a redução das emissões de poluentes, a recuperação energética e a gestão de recursos, um sistema de gestão de RSU, considerado ótimo, inclui quatro elementos: redução nas fontes; reciclagem de aproximadamente 60% de ferro, alumínio, vidro, papel, madeira e plásticos para reduzir a demanda por matéria-prima; compostagem de um percentual o mais alto possível de resíduos alimentícios, e resíduos florestais para uso como fertilizantes do solo; e recuperação energética do material residual em usinas de WTE para cogeração [62].

Uma questão frequentemente abordada diz respeito a uma possível diminuição nos índices de reciclagem, por conta da implantação de sistemas WTE. Porém a experiência evidenciada na Europa mostra que países com taxas relativamente elevadas de recuperação energética também apresentam taxas de reciclagem acima da média [63]. Experiências contrárias, provavelmente se devem ao fato de que campanhas não tão eficientes tenham sido aplicadas, ou que a infraestrutura e os incentivos não tenham sido adequados.

6.3 COMBUSTÍVEIS E MÉTODOS DE PROCESSAMENTO

Como é considerado agora um combustível, a utilização de RSU apresenta alguns desafios. Estes são produzidos de forma distribuída, além de sua composição ser frequentemente variável, incluindo uma mistura de componentes orgânicos e inorgânicos. Componentes perigosos e resíduos tóxicos encontrados no fluxo de resíduos podem colocar a saúde e a segurança de trabalhadores em risco. Valores relativamente baixos de densidade energética e altos de umidade contidas nos materiais, cloro, e o conteúdo de cinzas representam considerações adicionais que precisam ser feitas com relação a manejo, combustão, incrustações, corrosão e gestão de subprodutos. Esses desafios criam a necessidade de que esses materiais sejam separados previamente na fonte, além da aplicação de tecnologias de processamento de combustível, com o grau necessário, influenciando na opção do sistema de recuperação energética, como mostrado na Figura 24.

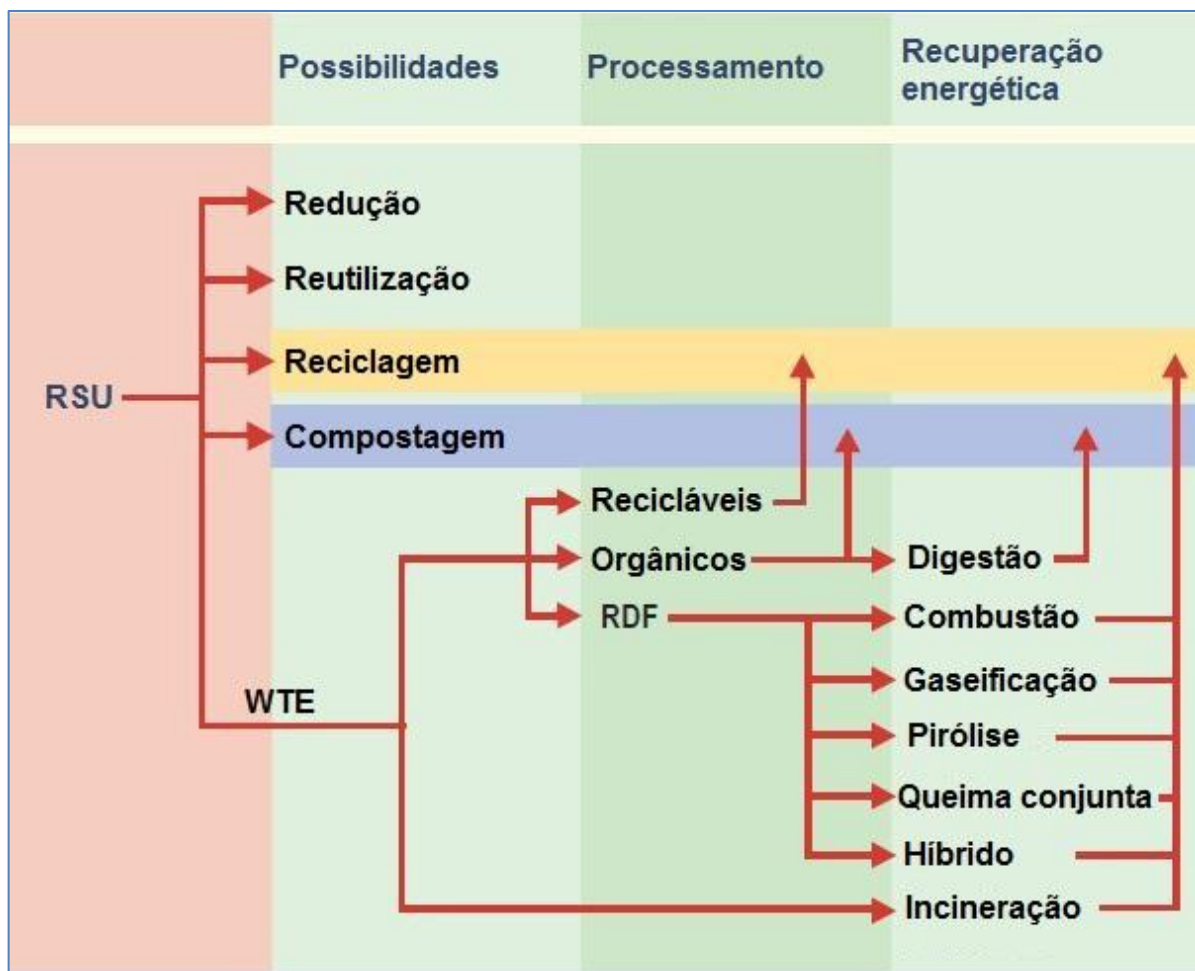


Figura 24 - Destinação de RSU

Fonte: EPRI [64]

RSU, da forma como são recebidos, têm poder calorífico na faixa de 2900 a 3500 kWh/tonelada [65]. Processamentos de mais alta seletividade resultam em combustíveis derivados de resíduos, RDF (*refuse-derived fuels*) – também conhecidos por combustíveis sólidos recuperados, SRF (*solid recovered fuels*) – os quais são mais apropriados para a queima em unidades de combustão com leito fluidizado, FBC (*fluidized bed combustion*) e em sistemas avançados de conversão térmica, e apresentam-se em potencial adequado para a utilização em queima associada com carvão em usinas termelétricas. As frações combustíveis dos RSU podem ser separadas fazendo-se uso de tratamento mecânico-biológico, MBT (*mechanical biological treatment*), do qual fazem parte: triagem, classificação, e trituração para remover vidro, pedras, eletrônicos, resíduos de construção e outros materiais inorgânicos; extração magnética de metais ferrosos; separação por corrente de *Foucault* para metais não ferrosos; e fragmentação grosseira. Tratamento térmico em autoclave, processo de eliminação bacteriana e métodos de

lavagem também podem ser aplicados. Material residual – principalmente uma mistura de papéis e plásticos – são pulverizados e secados para formar um material leve e de consistência relativamente uniforme com poder calorífico aproximado de 3500 a 4200 kWh/ton. Idealmente RDF deve ser embalado como cubos ou em forma de *pellets* para que seja transportado e armazenado de forma mais conveniente [66].

Há ainda um combustível derivado de resíduos que tem maior poder calorífico, conhecido como PEF (*processed engineered fuel*), que é um tipo de RDF com valor agregado maior. Geralmente é produzido através de materiais classificados e resíduos mecanicamente processados, como materiais de embalagens e pneus, e de misturas personalizadas de papel, plástico e outros materiais. As formulações de PEFs proporcionam valores de poder calorífico na faixa de 4200 a 10.300 kWh/ton, e as características do combustível devem ser adaptadas, para atingir as especificações individuais de cada fornalha, ou para facilitar a queima em conjunto com outros materiais ou a conversão em sistemas térmicos avançados [64].

A mais alta densidade de energia, as características de manejo melhoradas, e os conteúdos reduzidos de umidade e cinzas dos combustíveis derivados se traduzem em menores taxas de utilização de combustíveis auxiliares e custos de O&M. Fica claro também que realizar esses beneficiamentos, no que diz respeito à instalação e manutenção de um sistema de processamento de combustíveis local, implica em uma contrapartida energética e de custos. O processamento centralizado desses combustíveis gera uma potencial economia em fator de escala, enquanto que o processamento na fonte proporciona uma possível redução nos custos de logística, facilitando comércio a distâncias relativamente elevadas.

Para tecnologias ADTE, o processo de digestão tem como subprodutos resíduos sólidos e líquidos. Decomposição é um processo que pode levar anos a décadas em aterros sanitários, e dias a semanas em digestores apropriadamente projetados. Gás de aterro é comumente coletado e utilizado para servir as necessidades locais de energia. Em estações de tratamento de esgoto e águas residuais, os gases resultantes da digestão ocorrida pela transformação da fração sólida de esgoto doméstico, tradicionalmente tem sido queimados para processos de aquecimento, mas um crescente número de estações está fazendo uso destes gases em sistemas de cogeração de eletricidade e calor, CHP. Estercos de criações de suínos e aves, crescentemente, estão sendo utilizados para geração de

combustíveis para conversão energética. Adicionalmente, a digestão representa uma aplicação emergente para a recuperação energética de RSU orgânico separado na fonte ou via MBT. Em sistemas especificamente projetados, a digestão anaeróbica produz combustível com conteúdo de metano mais elevado que o gás de aterro sanitário. Produzido a pressão atmosférica e saturado em água, o biogás, tipicamente, deve ser comprimido e tratado antes de ser utilizado para a conversão energética. Dependendo da utilização do combustível, tratamentos prévios adicionais podem ser necessários para remover siloxano, sulfeto de hidrogênio, e outros componentes que podem causar problemas de controle ambiental, de corrosão, de erosão, e de mau cheiro. Limpeza e purificação adicionais são necessárias para atingir o nível de biometano requerido, para injeção em redes de gás natural, por exemplo [58].

6.4 TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS

Existem diversas tecnologias de WTE, e elas oferecem uma variedade de produtos de seus sistemas e, hoje em dia, estão em vários estágios de desenvolvimento, mas todas têm dois objetivos em comum: a gestão de resíduos e a conversão em energia útil. Processos convencionais baseados em queima transformam resíduos sólidos em calor para uso direto ou para gerar vapor e conversão em eletricidade, enquanto processos mais avançados convertem sólidos em combustíveis líquidos e/ou gasosos oferecendo mais amplas possibilidades de uso. A Figura 25 mostra o estado de uma gama de tecnologias de WTE, mostrando a dimensão à qual o investimento em pesquisa e desenvolvimento (P&D), público e/ou privado, é requerido para que se alcancem sistemas comercialmente maduros.

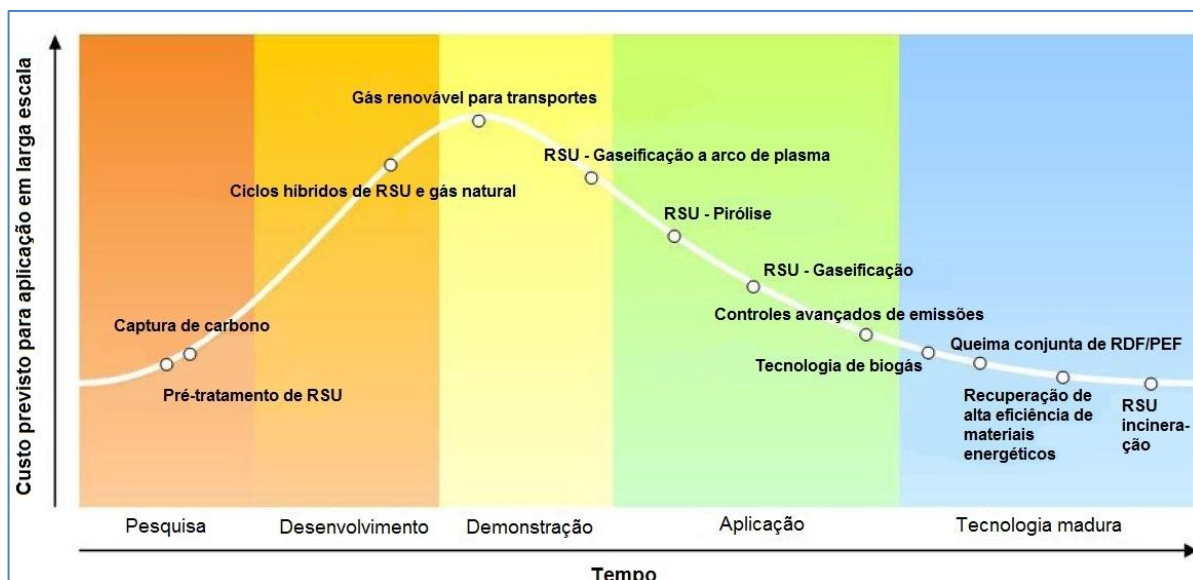


Figura 25 - Estado de desenvolvimento de tecnologias WTE

Fonte: EPRI [64]

Comparar a viabilidade econômica, o desempenho energético e o ambiental, das tecnologias WTE se demonstra relativamente difícil. Tradicionalmente, incineração e outras opções de WTE têm sido avaliadas, tomando como base os valores em unidade monetária por tonelada (\$/ton) de RSU eliminado, em comparação com o custo para descarte em aterros sanitários ou com a sua capacidade de cumprir os objetivos de planos de gestão integrada de recursos, ao invés de em unidade monetária por kW (\$/kW) ou por kWh (\$/kWh), comumente utilizado na indústria energética. Características locais de desempenho se mostram variáveis, dependendo de diversos fatores.

Tendo como perspectiva a recuperação energética, produzir água quente para uso direto em aquecimento distrital, onde se aplique, é a forma mais simples e mais eficiente para o aproveitamento energético de RSU, com valores de eficiência da ordem de 60%. A geração de vapor para processos de aquecimento distrital e industrial ou para aplicação em unidades CHP é um pouco menos eficiente, enquanto que a queima combinada de RDF e PEF em termelétricas a carvão reduz ainda mais a eficiência de conversão para valores abaixo de 30%. Estações de conversão elétrica baseadas em tecnologia de ciclos a vapor, em plantas com incinerador dedicado ou FBC, oferecem eficiências menores, de aproximadamente 20%, devido primeiramente às propriedades do combustível, tamanho e estrutura da caldeira, perdas térmicas, assim como pela redução da energia exportada, pelo fato de que energia extra é necessária para os sistemas de controle de poluição.

Processos de conversão de RSU, que produzem combustíveis gasosos apropriados para queima em plantas que utilizam turbinas a combustão e ciclos combinados, oferecem um potencial para ganhos substanciais na eficiência para conversão em energia elétrica. Motores a combustão interna são, atualmente, a principal opção para a conversão de energia química, dos gases de aterro e do biogás, em calor e eletricidade, mas diversas outras tecnologias estão disponíveis. Combustíveis gasosos derivados de processamento de resíduos podem ainda ter seu uso combinado em usinas que utilizam combustíveis fósseis, ou passar por processos de purificação, para injeção em redes de distribuição de gás, para que haja elevação na eficiência de seu uso final [58], [67].

6.4.1 Conversão térmica convencional

Incineração é a tecnologia relativamente mais simples e de menor custo para tratamento de resíduos, com conversão em energia elétrica. Centenas de estações com incineradores estão em operação em todo o mundo, apoiando-se em uma tecnologia consolidada, a qual é capaz de queimar RSU sem nenhum tratamento, ou combustíveis derivados de processamento básico de resíduos, em caldeiras. Geralmente nos fornos uma esteira em forma de grade passa dentro da câmara de incineração, onde um combustível alternativo é queimado, como por exemplo, gás metano ou propano, e assim os resíduos levados por essa esteira são incinerados. Tecnologia de combustão com leito fluidizado, tecnologia *FBC*, oferece maiores eficiências de conversão e menores emissões de poluentes, mas sua aplicação tem sido preterida em relação a outras tecnologias pela limitação na disponibilidade e pelos mais elevados custos de RDF. O combustível processado forma o leito dentro do reator e um fluxo de ar é injetado na câmara de baixo para cima, fluindo através do combustível para que a queima seja possível. Uma velocidade do fluxo de ar é aplicada, tal que as partículas possam ser suspensas, mas não a ponto de serem expulsas pela exaustão, e então se forma um leito fluidizado, ou seja, com gás, situação bastante favorável para uma combustão mais uniforme e eficiente [59] [68].

Para os dois tipos de plantas, o vapor é gerado por sistemas que fazem a troca de calor, da energia térmica gerada na câmara de combustão com um fluxo de água. Esse vapor impulsiona um grupo turbina-gerador, e a energia elétrica é transmitida através de uma subestação para a rede, como mostrado na Figura 26. A energia líquida de saída é da ordem de 550 a 600 kWh/ton de RSU. Os gases de

exaustão da turbina são direcionados para um resfriador/condensador, mas em aplicações de cogeração o calor pode ser recuperado, e alimentar o fluxo de água ou vapor para um sistema de distribuição de aquecimento distrital ou para processos que necessitem de calor. Sistemas de manejo e tratamento são aplicados para atender necessidades de controle de emissões de poluentes, maximizar a reciclagem e beneficiar a reutilização de subprodutos sólidos, e minimizar o descarte em aterros. No entanto esses sistemas geralmente significam uma carga adicional de combustível auxiliar, de aproximadamente 20%, que acarretam em diminuição da energia líquida exportada para a rede. Sistemas de derretimento de cinzas, por exemplo, podem reduzir a energia total exportada para uma faixa aproximada de 350 a 400 kWh/ton [64].

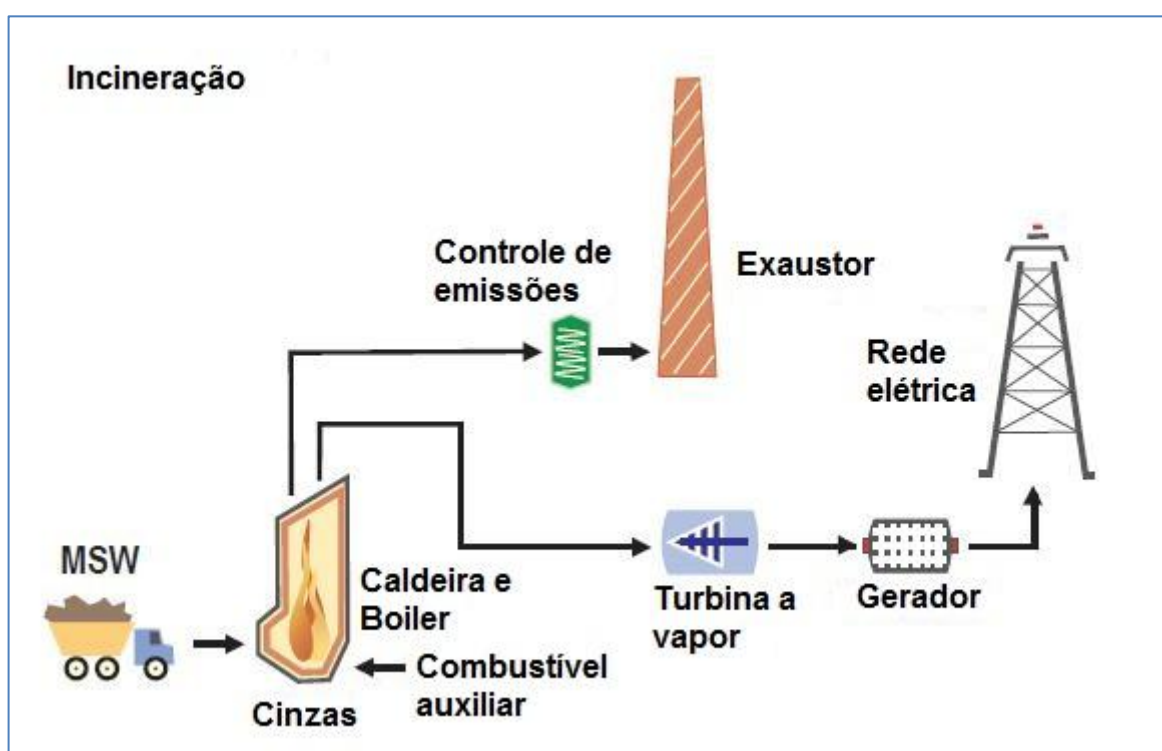


Figura 26 - Estação de tratamento baseada em incinerador

Fonte: EPRI [64]

Incineradores modernos, que suprem a necessidade de áreas relativamente grandes, podem ter capacidade da ordem de 75 MW, mas unidades de 25 MW e menores são comuns, na Europa e na Ásia. Elas são similares as plantas a carvão, e queimam um combustível com um valor energético equivalente; ainda, para a implantação dessas unidades pode ser necessário um investimento inicial algumas vezes maior em uma base de \$/kW [69]. Adicionalmente, para se alcançar

economias de escala associadas a incineradores de menor porte, a disparidade é atribuída ao fato de que incineradores tradicionalmente têm sido projetados para descarte confiável e ambientalmente correto de resíduos, e não como plantas de geração de energia de baixo custo. O sistema elaborado requerido para o manejo de RSU, controles de poluição ambiental para evitar emissões de poluentes indesejados, além da gestão de quantidades relativamente elevadas de subprodutos sólidos, são elementos significantes na constituição do preço total do sistema.

6.4.2 Conversão térmica avançada

Tecnologia de conversão avançadas transformam RSU em combustíveis líquidos e gasosos favorecendo a conversão energética baseada em combustão. Devido ao fato de que essas opções geralmente se aplicam a materiais biogênicos e plásticos, são utilizados geralmente RDF e PEF, mas os requisitos variam. Geralmente os objetivos dos projetos são de melhorar a recuperação de materiais e taxas de reciclagem, melhorar a qualidade dos materiais recicláveis, simplificar a limpeza dos gases de exaustão, além de reduzir a quantidade e melhorar a qualidade de subprodutos, que devem ser depositados em aterros sanitários. Como mostrado na Figura 27, esses objetivos ambientais também podem mudar a análise econômica de sistemas WTE, pois a limpeza dos gases de exaustão, manejo de cinzas e sistemas associados contribuem com mais de 15% do custo de capital de um incinerador moderno, enquanto que a gestão de subprodutos requer gastos operacionais contínuos [58]. O cenário apresentado para as estimativas é internacional, e provavelmente pode ser aplicado ao Brasil, com adaptações.



Figura 27 - Componentes do custo total – Incinerador

Fonte: Powermag [58]

Pirólise envolve aquecimento de RSU por energia assistida, na ausência de oxigênio, dentro de uma faixa de temperatura de 400 a 800°C. Subprodutos incluem líquidos voláteis e gás de síntese (*syngas*) – com proporções relativas dependendo da temperatura do processo – mais uma mistura constituída essencialmente de metais, que podem ser reciclados. Gaseificação envolve o aquecimento de RSU misturado ou de combustíveis derivados de resíduos a temperaturas que excedendo 700°C na presença de oxigênio suficiente para possibilitar a oxidação parcial, mas não o bastante para a combustão total. Esse processo energeticamente assistido produz uma mistura de gás de síntese composta por hidrogênio, monóxido de carbono, vapor d'água, metano, e outros componentes. Devido à necessidade de se injetar oxigênio (O₂), em muitos casos é utilizado o ar atmosférico para esse propósito, já que nele está presente um teor de aproximadamente 20,95% do gás. No entanto além do oxigênio é injetado também nitrogênio (N₂), que é um gás inerte, presente na proporção de aproximadamente 78,08% no ar atmosférico. Dessa forma, pode-se levar à formação de um combustível com poder calorífico mais baixo. O principal subproduto sólido é uma escória quimicamente inerte, vitrificada, que pode ser reutilizada. Gaseificação a arco de plasma, uma tecnologia desenvolvida para a incineração de resíduos perigosos, envolve o uso de um reator de gaseificação em conjunto com eletrodos de alta tensão que criam uma tocha de

plasma. A tocha opera a aproximadamente 1200°C, bem abaixo das temperaturas aplicadas para destruir resíduos perigosos, mas suficiente para transformar a mistura complexa de gases em um gás de síntese mais simples. Escória reciclável também é produzida.

Uma vez tratado, o gás de síntese derivado de RSU pode ser queimado em motores de combustão interna, geralmente dimensionados em passos de 1 MW, ou menos comumente em conjuntos que se baseiam em caldeiras, vapor e grupos turbina-gerador. Com processamento adicional, pode ser utilizados em turbinas de combustão ou unidades de ciclo combinado como mostrado na Figura 28.

As unidades são geralmente dimensionadas em 20 MW ou menos, e a eficiência elétrica pode alcançar de 25 a 40%. A recuperação energética pode gerar escória reciclável, material residual que deve ser depositado em aterros, ou ambos. Devido ao processo extensivo pelo qual o RSU passa, e os estágios de tratamento do gás de síntese associados nessas tecnologias, as concentrações de poluentes nos gases de exaustão são geralmente mais baixas que as encontradas na exaustão de incineradores, e alguns componentes tóxicos podem ser eliminados. Isso leva ao uso de sistemas de controle de emissão de poluentes similares, porém menos intensivos. As necessidades para manejo de cinzas são bastante reduzidas e podem ser eliminadas. Processamento adicional de gás de síntese pode possibilitar uma qualidade compatível para injeção em gasodutos, e adicionalmente a substituição renovável do gás natural, de outras fontes de energia e matérias-primas.

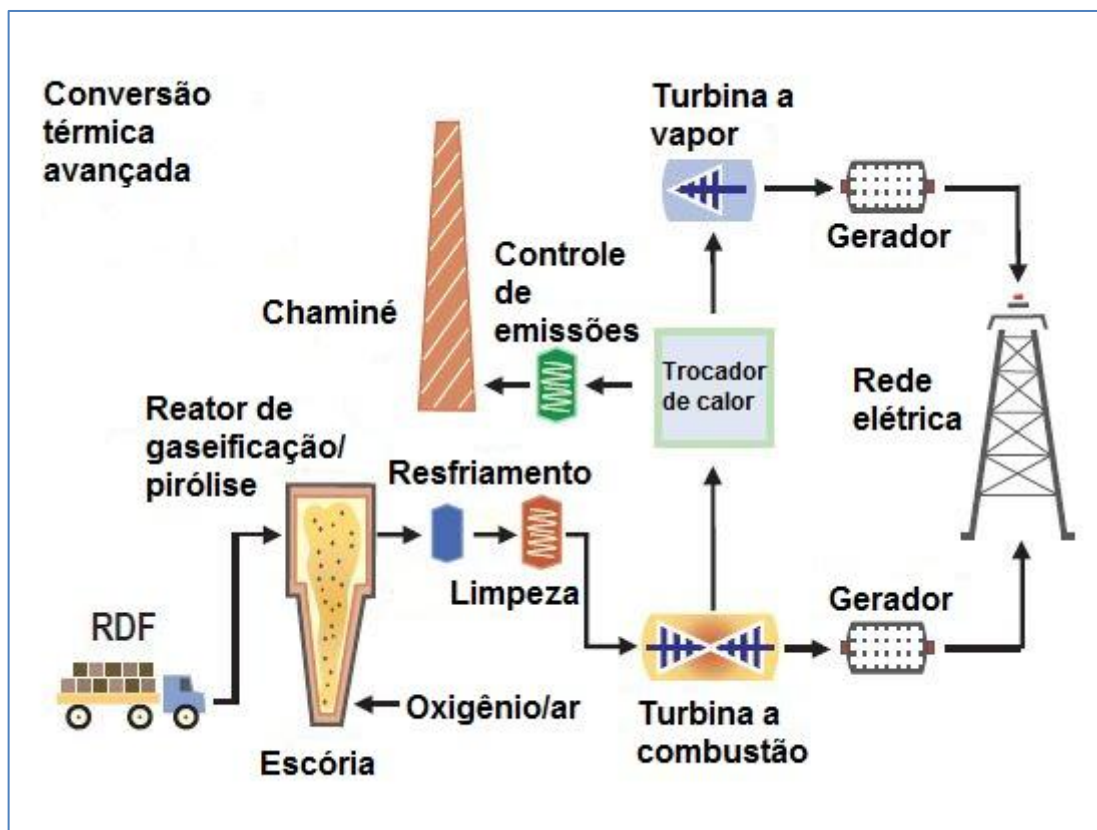


Figura 28 - Sistema de conversão térmica avançada

Fonte: EPRI [64]

Diversas tecnologias como gaseificação, pirólise e tecnologias híbridas, estão sendo submetidas a testes em larga escala ou em uso comercial na Europa, Israel, Japão, China e outros países asiáticos. Elas ainda não estão comercialmente consolidadas mesmo em escalas menores [70]. A complexidade maior do sistema, e a necessidades de se fornecer ao sistema aquecimento, oxigênio e outras entradas fazem com que os custos de instalação e O&M sejam mais elevados. Cargas adicionais que são necessárias para iniciar e sustentar os processos de conversão, suprir a demanda de oxigênio e tratar o gás de síntese, podem reduzir a energia elétrica total injetada na rede. Estimativas de geração são da ordem de 300 a 700 kWh/ton para a maioria das tecnologias envolvendo pirólise e gaseificação, mas ultrapassam os 1.000 kWh/ton para gaseificação a arco de plasma. Em geral, a implantação global dessas tecnologias não tem sido expandida devido aos altos custos e riscos. Porém, no Japão, essas tecnologias de WTE são mais utilizadas para novas plantas. São mais de 100 usinas instaladas nos últimos anos, e essa escolha se deve ao fato de que os subprodutos sólidos são reutilizados ao invés de serem depositados em aterros sanitários, já que o país tem limitações de espaço, devido à alta densidade demográfica, pelo menos 14 vezes maior que a do Brasil

[71]. Em muitos países ainda é necessária a implantação de usinas piloto e a efetivação da comercialização, para que essas tecnologias aumentem a participação no mercado de WTE [64].

6.4.3 Conversão biológica

A digestão anaeróbica baseia-se em processos biológicos para produzir combustíveis gasosos, que têm considerável densidade energética e se apresentam em uma forma de mais fácil utilização [7]. Em ambientes fechados com estrutura de plástico, concreto ou metal, os processos ocorrem e podem ser gerenciados, alterando as características e taxas de alimentação, controlando as condições físicas, e fazendo adições químicas e biológicas. As condições para a decomposição ocorrida em aterros sanitários, com estrutura para coleta de gases, são menos controladas. Ainda, o gás resultante da digestão é tipicamente convertido em outras formas de energia, na fonte, ao invés de ser transportado para uma estação central. Diversos projetos de ADTE, baseados em gás de aterro e em combustíveis derivados de resíduos agrícolas e de esgoto, estão em operação comercial mundo afora, enquanto a digestão de frações biogênicas de RSU ainda é uma aplicação emergente para a gestão de resíduos sólidos. Para que se possa obter a parcela biogênica do RSU, um tratamento prévio pode ser aplicado para se separar às parcelas residuais de recicláveis e não combustíveis, e então isolar os materiais orgânicos para que sejam destinados ao digestor. Em alguns casos, usinas de ADTE têm um sistema de emergência, que é a alimentação do grupo gerador por gás natural ou propano, para assegurar a produção constante de energia [7] [58]. Um exemplo de sistema de usina de biogás é mostrado na Figura 29.

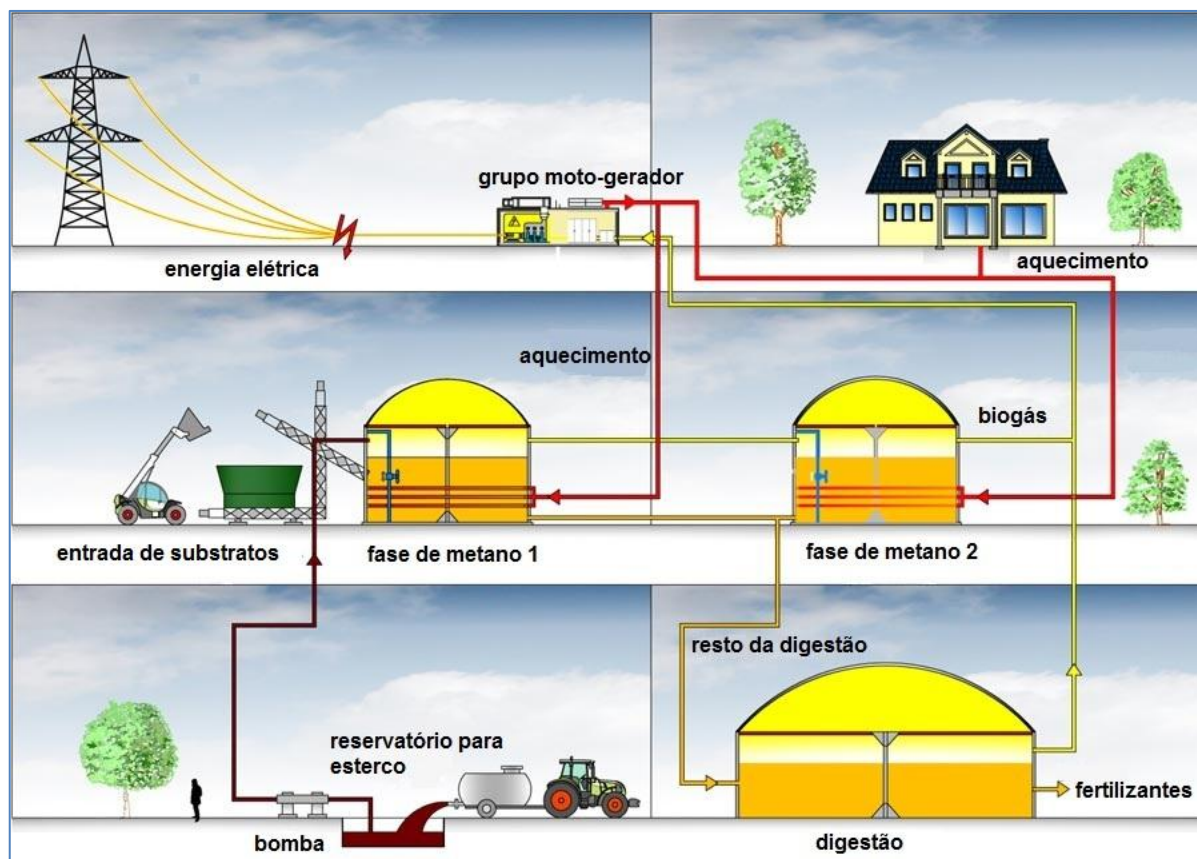


Figura 29 - Usina de biogás

Fonte: ME-LE Biogas [72]

6.4.4 Queima conjunta e ciclos híbridos

Combustíveis sólidos derivados de RSU, gás de síntese e biogás podem alimentar conjuntamente usinas a carvão, e ainda serem utilizados em ciclos híbridos que usam de forma distinta, alimentações a combustíveis fósseis e a combustíveis derivados de resíduos. Dependendo da característica do combustível e das políticas ambientais, essas possibilidades podem apresentar alternativas para redução de custos de combustíveis e de emissões de gases do efeito estufa, ao mesmo tempo em que produzem energia renovável.

Algumas especificações apropriadas são críticas, para que uma utilização bem sucedida da queima conjunta de RSU com carvão ocorra. Experiências indicam que PEF com poder calorífico da ordem de 5.400 a 7400 kWh/ton (com base em sua massa seca) pode contribuir com até 30% da energia de entrada de uma caldeira alimentada a carvão [64]. Já para a queima conjunta de RDF, a taxa de contribuição deste material deve ser menor, devido a mais baixa qualidade do combustível, pois partículas de metal e pedaços de vidro representam problemas para a combustão, além de que concentrações relativamente altas de cloreto podem provocar corrosão,

e níveis mais elevados de produção de cinzas criam o desafio do gerenciamento de subprodutos. Uma taxa típica de mistura de combustível sólido é de 3% ou menos, enquanto que sistemas de injeção independente permitem taxas de até 10%. Gás de síntese e gás de digestão, de outras fontes, podem também ser queimados em conjunto em unidades de conversão elétrica a vapor, operando com carvão, óleo diesel ou gás natural. Projetos de ADTE com suprimento local de combustível fóssil oferecem mais possibilidades de queima em conjunto.

As unidades híbridas mais simples apresentam, em suas configurações, caldeiras individualmente queimando RSU e combustível fóssil, alimentado o mesmo grupo turbina-gerador, com vapor.

6.4.5 Gás renovável

Gases de aterro, de digestão e de síntese, podem passar por processo de purificação, para alcançar níveis de biometano, e então serem injetados na rede de gás natural, possibilitando a utilização direta na indústria ou na mobilidade. Os exemplos citados no Capítulo 7 mostram a utilização dessa tecnologia [7], [58].

Com as tecnologias de WTE explicadas de forma mais detalhada é possível fazer uma análise de quais dessas tecnologias podem ser aplicadas de maneira viável na região no Médio Vale do Itajaí. Esta análise será feita no capítulo seguinte.

7 APLICAÇÃO DE TECNOLOGIAS DE RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA DE RESÍDUOS, COM ÊNFASE NA GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA NO MÉDIO VALE DO ITAJAÍ

7.1 METODOLOGIA

As análises da aplicação de tecnologias de conversão energética de resíduos, neste trabalho, são baseadas em informações teóricas e práticas de eficiência de conversão, para diferentes tecnologias. Para isso, são comparadas as informações da teoria com a de casos onde estas tecnologias já estão em funcionamento. Identificar a eficiência da conversão da energia química contida nos materiais em análise, em energia elétrica é o objetivo deste estudo. Além disso, pretende-se fazer a estimativa da quantidade de energia capaz de ser produzida, com base na quantidade de resíduos sólidos urbanos coletados diariamente na região em questão.

7.2 ATUAL SITUAÇÃO DA GESTÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS NA REGIÃO DE BLUMENAU

A região do médio vale do rio Itajaí-Açu, onde Blumenau está localizada, consiste de 15 municípios, dos quais 14 fazem parte da Associação dos Municípios do Médio Vale do Itajaí (AMMVI) [73]. Essa associação controla, regula e supervisiona serviços públicos municipais como limpeza urbana, gestão de resíduos sólidos, e outros serviços similares através da Agência Intermunicipal de Regulação (AGIR). Diariamente, na região controlada pela AMMVI, aproximadamente 400 toneladas de RSU, são coletados e então enviados ao aterro sanitário de Brusque, cidade localizada a aproximadamente 40 km de Blumenau. Apenas na cidade de Blumenau, em torno de 6.700 toneladas de RSU são coletados por mês, das quais apenas 370 toneladas correspondem a materiais recicláveis previamente separados [74]. Os materiais reciclados são separados pela população em suas próprias residências, e então recolhidos pelo serviço de coleta seletiva. Este serviço cobre hoje, aproximadamente a metade das ruas da cidade, com a utilização de caminhões que fazem a coleta em datas e horários pré-fixados. Dos materiais que são recolhidos pela coleta seletiva a maioria é composta por papel, papelão, vidro, metais, plásticos prelevados, isopor, óleo de cozinha e eletroeletrônicos. Todo o resto, hoje em dia, é depositado no aterro sanitário [74].

Alguns tipos de resíduos da indústria como alguns materiais feitos de borracha, plástico e couro, não podem ser reciclados ou depositados em aterros. No entanto a empresa Momento Ambiental [75], que é responsável pela coleta desses materiais na indústria, torna-se parcialmente responsável pela destinação correta desse resíduo. A forma mais comum de se eliminar estes tipos de materiais hoje em dia, é através da queima conjunta em usinas termelétricas, que têm filtros especiais os quais impedem as emissões de gases e partículas poluentes. Todavia há um fato inconveniente que diz respeito à cobrança, por parte da usina, por tonelada de resíduos a ser queimado, sendo que este material queimado serve de combustível à usina. Dessa forma além de receber combustível a usina recebe ainda pagamento por tonelada de material recebido. E isto é interessante para o negócio, pois se trata de custo negativo da matéria-prima.

7.3 CASOS DE SUCESSO

Durante o desenvolvimento deste trabalho, o autor teve a oportunidade de conhecer sistemas de gestão de resíduos, que estão, plena e eficientemente, em operação. As estações estão situadas em países que são referência no desenvolvimento e aplicação de tecnologias de energias renováveis, gestão consciente de recursos, cuidados com o meio ambiente, além de outros fatores que objetivam a sustentabilidade. Seguem as principais estações visitadas e seus modelos.

7.3.1 Estação de tratamento de resíduos – OVVD (Ostmecklenburgisch-Vorpommersche Verwertungs- und Deponie GmbH) – Rosenow, Alemanha.

Localizada no município de Rosenow, no estado da Pomerânia Oriental na Alemanha, e inaugurada em 1995, esta estação pode tratar até 190.000 toneladas de resíduos anualmente.

No início da operação, os resíduos eram depositados no aterro sanitário *in natura*. O aterro foi projetado para evitar a infiltração de chorume no solo, e também equipado com sistema de coleta de água residual e gás. A água residual é tratada antes de retornar à natureza, já o gás coletado passa por processo de limpeza e compressão e é diretamente utilizado como combustível em um sistema CHP. Este sistema de descarte de resíduos foi utilizado até meados de 2005, quando uma modernização foi realizada na estação. No entanto os gases continuam a ser

gerados e assim devem permanecer por um tempo total de aproximadamente 20 anos, período no qual o sistema CHP continuará funcionando e gerando eletricidade e calor.

Hoje em dia o processo é diferente. Após a coleta os resíduos são encaminhados para estações de transferência, onde tecnologias de compactação são aplicadas para melhorar a eficiência do transporte. Após serem compactados os resíduos seguem para a estação da OVVD, em Rosenow.

Chegando a estação os resíduos são pesados e encaminhados para o galpão de tratamento MBT, onde a triagem acontece. A parcela de RDF é enviada para uma usina termelétrica alimentada puramente por este combustível, mas que conta com combustível auxiliar para casos de emergência. Esta usina fornece energia térmica e elétrica para uma fábrica de refinamento de batatas, que está localizada nas proximidades. Os resíduos derivados de madeira são encaminhados para a usina termelétrica de uma cidade vizinha, onde são queimados em conjunto com outros combustíveis. A parcela orgânica passa por tratamento biológico para se tornar material inerte e então ser depositada no aterro sanitário.

Está sendo estudada a possibilidade de substituição deste modelo por digestão anaeróbica, que faz parte das tecnologias de WTE. A implantação deste modelo, além de um parque solar fotovoltaico e de um parque eólico, no mesmo local, torna a usina de descarte de resíduos em um parque de geração de energia renovável, com capacidade estimada em 15 MW. A Figura 30 mostra a vista de cima do aterro, onde embaixo estão depositadas milhares de toneladas de resíduos. Ao fundo pode-se ver a estação de tratamento MBT, no centro da imagem uma das conexões da tubulação do gás aparece, onde monitoramentos acontecem periodicamente [76].



Figura 30 - Estação de tratamento de resíduos e aterro com recuperação energética – OVVD

7.3.2 Estação de tratamento de resíduos – EVG (Entsorgungs- und Verwertungsgesellschaft mbH) – Rostock, Alemanha

Na estação de tratamento de resíduos situada na cidade de Rostock, Alemanha, o RSU da própria cidade, bem como de outras cidades da região é tratado por processo MBT, mostrado na Figura 31. Foram tratados desde o início das atividades em 01/06/2005 até 31/12/2010 aproximadamente 757.000 toneladas de resíduos domiciliares e alguns tipos de resíduos industriais, transformados em RDF e materiais estabilizados. Desde janeiro de 2009 o combustível derivado é entregue a uma fábrica vizinha que o utiliza em um sistema CHP. Existe também uma planta de digestão anaeróbica que trata os resíduos orgânicos e produz gás, ilustrada na Figura 32.



Figura 31 - Tratamento mecânico biológico – MBT

Na planta de digestão existem três fermentadores com volume útil de 1200 m³ cada. O material fica por cerca de 12 a 16 dias a uma temperatura de aproximadamente 55 °C. E ainda um sistema mistura os substratos constantemente para proporcionar maior homogeneidade nas reações e liberação do gás.



Figura 32 - Planta de digestão anaeróbica

Um sistema CHP, composto por duas unidades de 625 kW cada, faz uso do gás no local. O calor do motor a gás é utilizado para o aquecimento do digestor. Não é necessário o armazenamento de biogás, pois devido ao controle realizado, a produção de gás é constante o que favorece o funcionamento do sistema. Uma análise dos gases de saída é feita constantemente para monitorar a qualidade e também por questões de segurança, visto que a existência de níveis mais elevados de oxigênio pode dar condição para que uma explosão ocorra.

No ano de 2010 foram produzidos 5.880.106 m³ de biogás, e com a sua queima 9.081.810 kWh de eletricidade foram gerados. Além disso, 2.109.300 kWh de calor residual da queima do gás no motor foram gerados, e utilizados para aquecer o digestor. Com esse processo mais de 6.000 toneladas de dióxido de carbono deixaram de ser lançadas na atmosfera. Na fase de planejamento a empresa estimou uma quantidade de 120 a 130 m³ de biogás para cada tonelada de resíduo orgânico fermentado. Mas, de fato, a quantidade gerada hoje é de 200

m³/tonelada. O que fez com que a planta, em operação a plena carga, tivesse excedentes de gás.

Havia duas opções para a utilização do gás excedente, a construção de mais um módulo CHP de 625 KW, ou ainda a implantação de um sistema de purificação do biogás, para alcançar o padrão de gás natural e injeção na rede municipal. A empresa optou pela segunda opção e em 2011 implantou o sistema. Até então as metas para os anos posteriores eram as seguintes:

- Produção de biometano: 3.200.000 m³/ano = 30 GWh/ano
- Cogeração a partir do biogás: 5 GWh/ano de eletricidade + 3 GWh/ano de calor.

Sendo que no total serão gerados em torno de 38 GWh de energia por ano além de uma redução nas emissões de CO₂ de 15.200 toneladas por ano. A Figura 33 ilustra o sistema CHP e o sistema de purificação do biogás, que pode ser visto na torre, no centro da imagem. É importante verificar que o biometano é produzido a partir da purificação do biogás, assim sendo seu volume resultante menor que o do gás de origem [77].



Figura 33 - Planta CHP e de purificação de biogás

7.3.3 Gestão de resíduos – Cidade de Borås, Suécia

Primeiramente, é importante salientar a singularidade do modelo aplicado na cidade de Borås, localizada no oeste da Suécia, e que tem hoje cerca de 100.000 habitantes. Uma cooperação entre o governo municipal da cidade, a Universidade de Borås, a empresa municipal *Borås Energi och Miljö* (Borås Energia e Meio Ambiente), e o instituto de pesquisas SP é a chave do sucesso. Os primeiros pontos que a parceria considera vital são educação e pesquisa. Por isso a importância da universidade, contribuindo com mão-de-obra qualificada, e do instituto de pesquisas que oferece educação em metodologia com foco no meio ambiente, além de análises e certificações. A empresa de energia trata do fluxo de energia na comunidade e converte a energia dos resíduos em aquecimento distrital, resfriamento distrital e biogás para consumidores. A empresa também atua no setor de eletricidade com a operação de plantas de cogeração e hidrelétricas.

O modelo começou a ser utilizado em meados de 1995 e ganhou maior impulso em 2002 com o estabelecimento de uma legislação que limitou o descarte de resíduos em aterros sanitários. Na cidade de Borås, todos os resíduos são

tratados como recursos, e dessa forma recebem tratamento adequado, visando a reciclagem e a recuperação energética.

Tudo começa nas residências onde os resíduos são separados pela população. Existe uma classificação dos resíduos, e estes são separados em pelo menos 30 frações. Os moradores recebem sacos de duas cores, pretos e brancos. No saco preto são colocados os resíduos orgânicos, já no branco são depositados os resíduos queimáveis, que não são passíveis de reciclagem ou reaproveitamento, na sua maioria plásticos e papéis. O caminhão de coleta leva os dois tipos de saco juntos. Todos os outros materiais são depositados separadamente nos condomínios, onde em torno de 15 recipientes diferentes são colocados, como diferentes tipos de plásticos e vidros, lâmpadas, baterias, metais dentre outros, como ilustrado na figura 34.

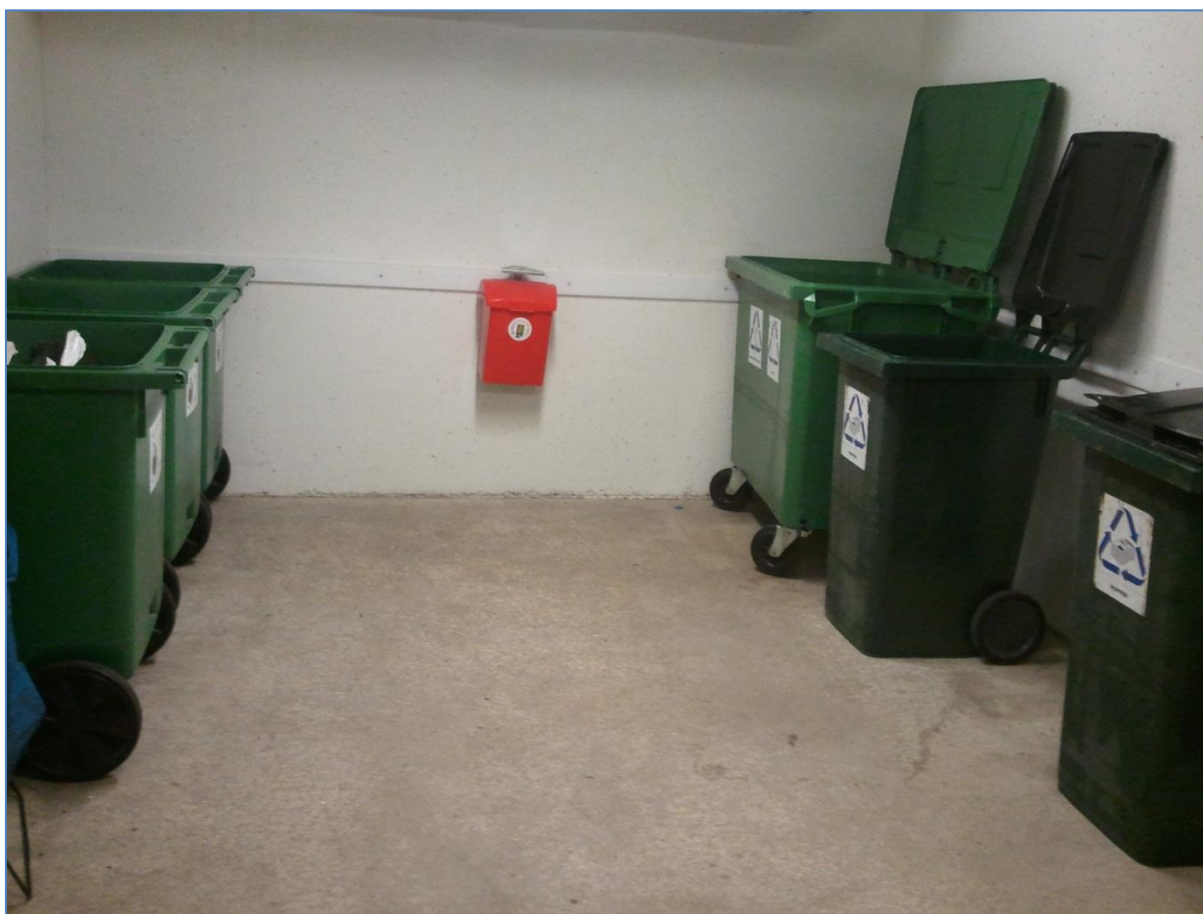


Figura 34 - Recipientes para separação dos resíduos em condomínios

Ou ainda para os moradores de residências, os resíduos precisam ser levados até estações de coleta espalhadas pela cidade. Alguns tipos de resíduos

como móveis, eletrodomésticos, e outros resíduos que tenham maior volume, também são levados pelos moradores até as estações maiores que estão localizadas em pontos estratégicos.

Os resíduos recicláveis são devidamente tratados em uma estação, os metais, vidros, plásticos e outros materiais são separados por tipo e então podem receber beneficiamento, serem reciclados, ou reutilizados. Toda a gestão é feita pela empresa Borås Energia e Meio Ambiente, que administra os recursos e se mantém com a receita das vendas de materiais e energia, trazendo benefícios para os moradores da cidade. Os resíduos que são separados em sacos brancos e pretos são coletados pelo mesmo caminhão e sem separação. São enviados para a estação de tratamento de Sobacken onde o fluxo de resíduos é pesado e então encaminhado para um sistema de classificação óptica. Os sacos são colocados na mesma esteira e um sensor identifica os sacos pela cor, e os separa em brancos e pretos. A Figura 35 mostra os sacos na esteira.



Figura 35 - Fluxo de resíduos a serem classificados opticamente

Os sacos pretos são destinados à estação de tratamento biológico, que também recebe resíduos orgânicos das empresas, de matadouros, de indústrias de alimentos, e restos de comida de restaurantes. A digestão anaeróbica é controlada e o material orgânico resultante é utilizado como fertilizante. O biogás produzido passa por processo de purificação e atinge níveis em torno de 97% de metano, e é então disponibilizado em estações de abastecimento de veículos, uma em Sobacken e em outras duas estações que recebem o gás por gasodutos. Hoje todos os ônibus urbanos da cidade e os caminhões de coleta de lixo são movidos a partir do gás extraído dos resíduos.

Ainda na estação de Sobacken, os resíduos oriundos dos sacos brancos são processados e enviados para a estação Rya. Nesta os materiais são também pesados e uma amostra de cada carga é retirada para que a análise do teor de

umidade e do conteúdo energético seja feita. Ainda são recebidos outros tipos de materiais queimáveis como madeira. É feito um processamento adicional nos materiais para secagem e retirada de metais. Existe também um local onde o combustível é armazenado para que o sistema tenha pleno funcionamento. Os resíduos são queimados em quatro caldeiras, sendo que duas são para combustíveis oriundos dos resíduos e outras duas para queima de biomassa. O vapor gerado é utilizado para mover os grupos turbina-gerador um de 20 MW e outro de 17 MW, que abastecem a cidade com energia elétrica. Uma parcela do vapor é utilizada para a secagem do combustível. Com o calor, água é aquecida e utilizada para aquecimento distrital. Existe uma torre que armazena água quente, com capacidade para 38.000 m³, para utilização em períodos nos quais as temperaturas são mais baixas [78].

Dessa forma é possível manter um sistema de gestão de resíduos com recuperação energética em pleno funcionamento, que hoje é modelo para todo o mundo. Seguem alguns números importantes:

- a cidade de Borås produz 411Kg de resíduos por pessoa todo ano;
- 96% de todo o resíduo produzido é transformado em biogás, aquecimento, arrefecimento, ou reciclado;
- 70% do gás produzido dos resíduos é utilizado para abastecer os ônibus urbanos e os caminhões de coleta de resíduos, os outros 30% são vendidos à população.

A Tabela 4 mostra a produção anual de eletricidade, calor e biogás para os anos de 2009 a 2011 e relaciona as quantidades de resíduos tratados em 2011.

Tabela 4 - Produção anual de energia e combustível

PRODUÇÃO ANUAL				
		2011	2010	2009
Eletricidade	GWh	141	147	153
Aquecimento distrital	GWh	682	820	706
Arrefecimento distrital	GWh	8	7,5	7,8
Biometano (Gás)	km ³	3.088	2.300	1.526
QUANTIDADE DE RESÍDUOS TRATADOS EM 2011				
Recicláveis	ton	56.700		
Resíduos para combustão	ton	90.300		
Resíduos para biogás	ton	63.000		

7.4 ANÁLISE COMPARATIVA DOS DADOS

No capítulo 6 foram verificadas as informações contidas na bibliografia, que se baseiam em dados teóricos e também em experiências práticas. Já na seção 7.2, casos práticos foram mostrados com a apresentação dos resultados obtidos com a utilização de sistemas em larga escala, e que estão em funcionamento. Nesta seção faz-se um comparativo entre os dados apresentados anteriormente neste trabalho. A Tabela 5 mostra o poder calorífico dos resíduos, e também os valores de eficiência elétrica total, dependendo do combustível e das tecnologias de conversão utilizadas.

Tabela 5 - Comparativo das eficiências de conversão entre diferentes tecnologias

	PODER CALORÍFICO (kWh/ton)	TECNOLOGIA	APROVEITAMENTO ELÉTRICO (kWh/ton)	EFICIÊNCIA ELÉTRICA (%)
RSU	2900 a 3550	Incineração/ FBC	350 a 400	11 a 12
RDF	3550 a 4200	Gaseificação/ Pirólise	300 a 700	8,5 a 16,5

Agora fazendo uma análise das informações coletadas de casos práticos, pode-se identificar a existência de particularidades em cada sistema. Para o sistema da cidade de Borås, a Tabela 6 mostra a produção de energia e combustível por quantidade de resíduo, considerando-se os valores anuais de resíduos tratados e a quantidade energética e de combustível, produzidas.

Tabela 6 - Valor de energia e volume de gás gerados por tonelada de resíduos

RESÍDUO		QUANTIDADE
Queimáveis	kWh/ton (Eletricidade)	1.410 a 1560
Orgânicos	m ³ /ton (Biometano)	49 a 81

Pode-se notar que os valores em kWh/ton alcançados para os resíduos queimáveis, no modelo em questão, são mais elevados que os encontrados na Tabela 5. Isso se deve ao fato de que outros materiais são utilizados em conjunto com os RSUs, e provavelmente seu poder calorífico é mais elevado, como é o caso da madeira.

Para o caso da estação de Rostock, com base nos dados coletados, pode-se estimar como média 137.000 ton/ano de resíduos tratados. Levando em consideração a produção de biogás e de energia elétrica de 2010, é possível alcançar a taxa de 1,55 kWh de energia elétrica gerada para cada metro cúbico de biogás produzido. Considerando o poder calorífico do biogás na faixa de 5,8 a 7 kWh/m³, como mostrado no Capítulo 1, a eficiência elétrica do sistema de conversão (energia química para elétrica) pode ser estimada como estando na faixa de 22 a 26% do valor energético do biogás. Considerando ainda que 30% de todos os resíduos tratados na estação sejam orgânicos, a quantidade anual destinada para a digestão anaeróbica é de 41.280 toneladas. Sendo assim, a quantidade energética por massa, produzida a partir da digestão e da queima do gás em um grupo motorizador, chega a 220 kWh por tonelada de resíduo orgânico.

Com relação a sistemas de conversão energética, pode-se fazer uma análise da eficiência máxima alcançada por cada uma das etapas, e assim determinar a eficiência aproximada total. No entanto, devido a particularidade de cada sistema e do combustível utilizado, os valores de eficiência, de conversão da energia química em térmica, podem variar significativamente. A eficiência de uma turbina a vapor pode chegar a 37%, considerando a conversão da energia mecânica do fluxo de vapor, que é convertida para o eixo da turbina [79]. Já para a conversão da energia mecânica em elétrica, pode-se alcançar eficiência na ordem de 98%, quando um gerador síncrono é utilizado. A Figura 36 mostra um diagrama de blocos com as etapas de conversão e as eficiências de cada uma das etapas, para o caso da incineração.

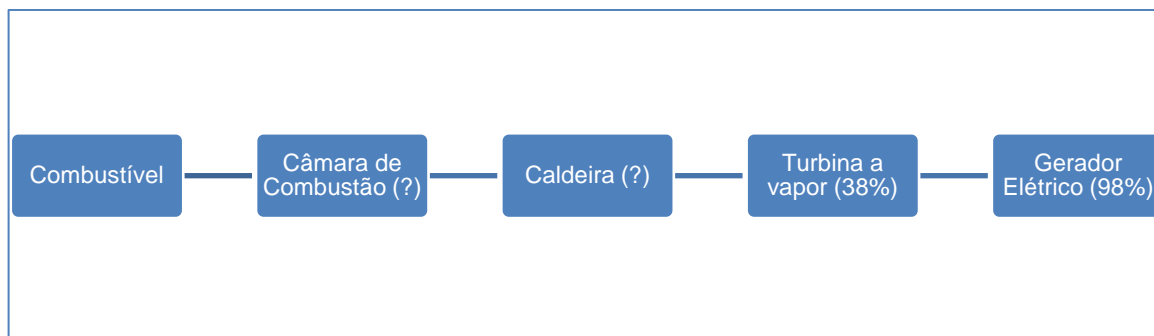


Figura 36 - Etapas do processo de incineração e suas respectivas eficiências de conversão

Pode-se verificar a dificuldade de se estimar a quantidade energética possível de se recuperar dos resíduos. No entanto, através das análises feitas neste trabalho, que comparam os dados teóricos com os práticos, alguns valores foram aproximados para que se possa fazer uma estimativa. A eficiência total do sistema, considerando como entrada os resíduos, e como saída a energia elétrica, também é dificilmente estimada. No entanto, valores de eficiência elétrica na faixa de 12% para as tecnologias de incineração e FBC, e 17% para gaseificação e pirólise, demonstram ser plausíveis e de certa forma até modestos.

A Tabela 7 faz um comparativo entre as diferentes tecnologias de WTE. Para a utilização de RSU e RDF são consideradas duas possibilidades para cada combustível, a primeira é a aplicação de tecnologia de conversão térmica convencional, sendo nesse caso incineração ou FBC, e a segunda faz uso de tecnologias de conversão térmica avançada, como gaseificação e pirólise. A eficiência elétrica foi considerada em 12% para conversão térmica convencional e 17% para conversão térmica avançada. Já para os resíduos orgânicos, a tecnologia considerada é a ADTE, e o aproveitamento elétrico foi estimado considerando o caso prático da cidade de Borås.

Tabela 7 - Valores aproximados de aproveitamento elétrico dos resíduos para diferentes tecnologias

RESÍDUO	TECNOLOGIA		APROVEITAMENTO ELÉTRICO
RSU	Incinerção/FBC	kWh/ton	348 a 426
	Gaseificação/Pirólise	kWh/ton	494 a 603
RDF	Incinerção/FBC	kWh/ton	426 a 503
	Gaseificação/Pirólise	kWh/ton	603 a 713
Orgânico	Digestão anaeróbica	kWh/ton	220

É importante salientar que esses dados são estimados, e que as particularidades de cada caso geralmente são inúmeras. Além disso, alguns

detalhes podem fazer com que as eficiências sejam aumentadas, como por exemplo, a geração em ciclos combinados onde o calor é reaproveitado. Outros fatores podem ainda fazer com que a eficiência diminua. No caso da incineração, existe a necessidade de utilizar combustível alternativo, que proporciona o início e a manutenção da combustão. Para a aplicação da gaseificação, a injeção de oxigênio no sistema pode vir a ser feita pela adição de ar atmosférico, que contém mais de 78% de nitrogênio, que é um gás inerte [80]. Por consequência a densidade energética do combustível produzido pode ser reduzida significativamente, nessas condições, formando assim um combustível considerado pobre em energia.

7.5 POSSIBILIDADES PARA A IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA DE GESTÃO DE RESÍDUOS, COM RECUPERAÇÃO ENERGÉTICA, NA REGIÃO DE BLUMENAU

A avaliação que é feita na sequência diz respeito à quantidade de energia que hoje não é aproveitada, sendo que o recurso vem sendo apenas descartado de forma incorreta, causando a poluição do solo e de águas, e também contribuindo para emissões de gases e substâncias poluentes, além de contribuir para a proliferação de doenças.

Conforme apresentado na seção 6.4 deste trabalho, existem diversas tecnologias para o aproveitamento energético de resíduos as quais se encontram em diversos níveis de maturidade tecnológica e grandeza de custos relacionados à aplicação em larga escala. Levando em consideração a relativa dificuldade de estimar valores, devido às particularidades que cada projeto apresenta. O que foi feito neste caso foi uma análise das tecnologias com base na capacidade de geração elétrica, em kWh/ton. Para algumas tecnologias isso não é possível sem mais detalhes, no caso da tecnologia ADTE, por exemplo, informações adicionais sobre os insumos são necessárias.

Dessa forma, são apresentadas algumas possibilidades de implantação de sistemas de gestão de resíduos na região de Blumenau. É importante verificar que as possibilidades apresentadas são para a gestão de RSU. No entanto, sabe-se que a quantidade de resíduos industriais e agrícolas é significativa e que a sua utilização em conjunto com RSU pode contribuir para a consolidação da viabilidade da implantação dessas tecnologias.

7.5.1 Primeira possibilidade - Incineração de resíduos pós-reciclagem

Neste caso, é considerada apenas a implantação de um incinerador de resíduos. Os trabalhos de reciclagem e separação nas residências podem e devem ter continuidade, além de serem intensificados. Porém, como hoje em dia na região de abrangência da AMMVI, os resíduos são separados em recicláveis e não recicláveis, a parcela não reciclada é destinada para o aterro. A mudança ocorrida seria apenas no destino deste resíduo que, poderia ser incinerado. A Figura 37 mostra um esquemático com o fluxo de resíduos e seu destino.

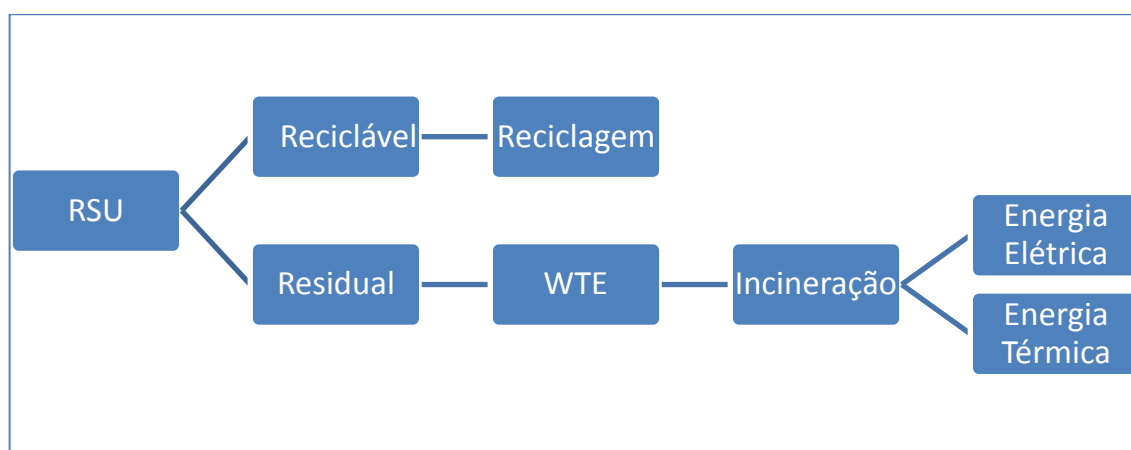


Figura 37 - Sistema de gestão de resíduos com incineração

Seguindo as estimativas apresentadas na seção 7.3 e considerando a utilização de somente RSU, com a incineração de 400 toneladas de resíduos por dia seria capaz de se obter de 139,2 a 170 MWh de energia elétrica por dia, ou de 4,2 a 5,1 GWh por mês. Ainda é possível a utilização do calor residual em indústrias, que necessitem de calor em seus processos. Levando em consideração o padrão de consumo de energia elétrica da região, em torno de 100 kWh por pessoa a cada mês, pode-se estimar o suprimento da demanda por energia de 41.000 a 51.000 pessoas, o que corresponde a aproximadamente uma cidade equivalente a Indaial, Santa Catarina.

7.5.2 Segunda possibilidade – Implantação de tecnologia de tratamento térmico avançado e ADTE

A incineração apresentada na seção anterior é, do ponto de vista energético e ambiental, uma alternativa mais interessante que o descarte em lixões ou aterros sanitários. Porém, devido às características do combustível queimado, a eficiência

total do sistema é mais baixa em comparação com outras tecnologias, além dos problemas de controle de emissões e manejo de cinzas, que são necessários. No entanto, havendo separação dos resíduos em uma parcela adicional, poder-se-ia implantar duas tecnologias WTE, além da reciclagem realizada hoje em cooperativa.

A separação poderia ser realizada em domicílio, neste caso os moradores deveriam separar os resíduos em três parcelas que seriam recicláveis, orgânicos e outros materiais. Outra possibilidade, que além de melhorar a eficiência do sistema deve aumentar bastante os investimentos, seria a implantação estação de MBT, que realiza a separação dos resíduos em parcelas distintas. Essa tecnologia deve ser utilizada, de qualquer maneira, para que ao final se obtenha materiais mais apropriados para o tratamento térmico e ADTE, com a retirada dos materiais inorgânicos como pedaços de vidro, pedras e metais. A figura 38 mostra o diagrama esquematizando o sistema de gestão.

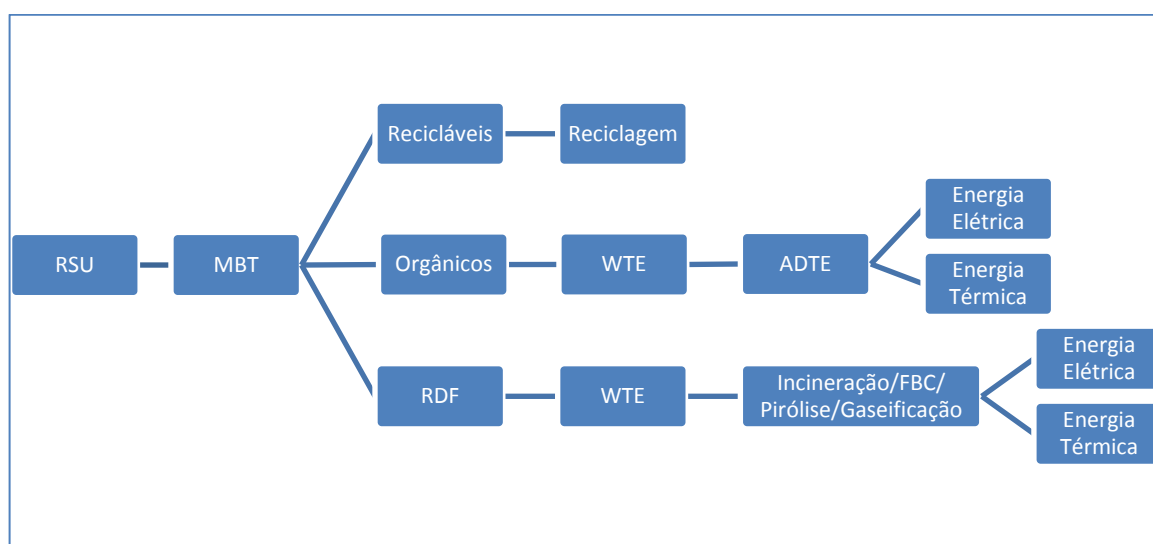


Figura 38 - Sistema de gestão de resíduos e recuperação energética

Levando em consideração os materiais já separados, e sem que seja necessária alteração no sistema de reciclagem, as outras duas parcelas poderiam então, ser aproveitadas de forma mais eficiente. Para o RDF as opções seriam combustão, FBC, pirólise ou gaseificação.

Conforme verificado, são coletadas em torno de 12.000 ton/mês de RSU na região, e considerando um percentual aproximado aos dos dois casos analisados previamente, estima-se que 40% sejam orgânicos, 30% sejam recicláveis e que os

30% restantes sejam dos materiais com característica mais próxima do RDF, o resultado são as quantidades aproximadas, descritas na tabela 8.

Tabela 8 - Quantidade de resíduos coletados na região do médio vale do Itajaí

TIPO	Quantidade mensal (ton)	Quantidade Anual (ton)
Recicláveis	3.600	43.000
Orgânicos	4.800	57.600
Outros (RDF)	3.600	43.000
TOTAL	12.000	144.000

No caso da Incineração ou FBC, uma usina deveria ser construída, na qual outros materiais poderiam ser adicionados ao processo em conjunto, como por exemplo, casca de arroz e PEF. Este último, podendo fazer parte o material que a empresa Momento Ambiental processa, transporta e paga para ser queimado em uma usina termelétrica; já o primeiro, talvez o resíduo agrícola em quantidade mais considerável na região de Blumenau.

Considerando a análise feita na seção 7.3, e fazendo-se uso das 3.600 ton/mês de RDF, seria possível alcançar uma produção de 1,5 a 1,8 GWh de energia mensalmente.

Já para o caso de implantação de reatores de gaseificação ou pirólise, o gás resultante poderia ser queimado em grupos geradores com motores ou turbinas. Seguindo as mesmas estimativas, a geração elétrica, para a mesma quantidade de RDF, poderia variar de 2,2 a 2,6 GWh/mês.

A quantidade mensal de resíduos orgânicos coletados na região é de 4.800 toneladas. Com base na Tabela 7, a quantidade de energia elétrica que se pode gerar ao se aplicar digestão anaeróbica aos resíduos orgânicos, tratar o biogás gerado e então usá-lo para a conversão em grupo moto-gerador, é de 220 kWh para cada tonelada de resíduo orgânico, já separado. Sendo assim, a estimativa de energia gerada a partir do aproveitamento dessa parcela dos resíduos regionais é de 1,06 GWh.

Para ambas as possibilidades de gestão de resíduos e recuperação energética apresentadas, caberiam ainda a modernização de lixões e aterros sanitários, para que houvesse impermeabilização do solo, captação de gás, geração de energia elétrica e térmica, assim como o aterro de Rosenow, na Alemanha, citado na seção 7.2.1.

Sendo assim, os dados das análises feitas para as duas possibilidades são apresentados na Tabela 9. Também nessa tabela, para efeito de comparação, são mostradas as informações de aproveitamento elétrico estimado para cada combustível e tecnologia utilizada, a energia total gerada e o número equivalente de habitantes que essa energia pode suprir.

Tabela 9 - Comparativo entre as possibilidades de aplicação de tecnologia WTE

A	B	C (ton)	D	E (kWh/ton)	F (kWh/mês)	G (habitantes)
1	RSU	8.400	Incineração/FBC	348 a 426	3.250.800	32.508
			Gaseificação/Pirólise	494 a 603	4.607.400	46.074
2	RDF	3.600	Incineração/FBC	426 a 503	1.672.200	16.722
			Gaseificação/Pirólise	603 a 713	2.368.800	23.688
	Orgânico	4.800	Digestão anaeróbica	220	1.056.000	10.560

A – Casos

B – Tipo de resíduo

C – Quantidade de resíduo

D – Tecnologia de conversão

E – Aproveitamento elétrico estimado

F – Energia elétrica gerada aproximada

G – Suprimento de energia elétrica, em habitantes, com a energia gerada

7.6 CONSIDERAÇÕES ADICIONAIS

No decorrer deste trabalho foram descritos alguns argumentos utilizados por especialistas da área de energias renováveis para que se intensifique a implantação e o desenvolvimento de tecnologias que façam uso desses recursos. Uma possível escassez de combustíveis fósseis não pode ser descartada de ocorrer nos próximos 20 ou 30 anos [1]. Até porque, caso isso ocorra, antes mesmo que esses recursos terminem seus preços terão altas que tornarão a sua utilização inviável. Uma volatilidade dos preços do petróleo já vem sendo percebida nos últimos anos. Tal fato pode ser evidenciado na variação dos preços, que ocorreu em uma faixa de 30% do preço máximo, para o período de dezembro de 2011 a maio de 2012 [81]. Essa instabilidade interfere na vida das pessoas, de diversas formas. Como exemplo, pode-se verificar a instabilidade dos preços de alimentos e outros produtos

essenciais que dependem, direta ou indiretamente, da utilização de combustíveis derivados do petróleo, principalmente nos transportes.

Do ponto de vista ambiental, é fato que a temperatura média da biosfera da Terra subiu nas últimas décadas, porém existe uma polêmica com relação a que se deve esse aquecimento. Pode ser devido a um ciclo de temperaturas que a Terra esteja passando ou devido à atividade solar mais intensa [28] [82], mas alguns estudiosos defendem a teoria de que esse aquecimento tem relação com as emissões de gases do efeito estufa [27]. Já como resposta, os defensores dos combustíveis fósseis argumentam que a poluição gerada pela atividade vulcânica é diversas vezes maior que a contribuição dada pelas atividades humanas [83]. O que é inegável é que as emissões geradas pela utilização de diversos combustíveis, principalmente por indústrias e na mobilidade urbana, fazem com que a qualidade do ar das cidades seja piorada, e que isso traz problemas de saúde para a população.

As mudanças climáticas que vêm ocorrendo, independentemente de sua origem, podem alterar em breve a quantidade de chuvas [84]. No caso do Brasil, isso pode levar a níveis menores de armazenamento em usinas hidrelétricas que disponham de reservatórios, e conseqüentemente a uma reserva menor de energia.

Analisando-se a segurança energética, fica claro que uma matriz que dependa de diversos recursos estará menos vulnerável à falta de um deles. Já os recursos renováveis estão disponíveis, mesmo que em quantidades relativamente pequenas, em praticamente todas as regiões do planeta. A expansão que vem ocorrendo em diversos países na aplicação de tecnologias de aproveitamento renovável causa uma queda nos preços. As tecnologias vão se consolidando e se tornando confiáveis, ao mesmo tempo em que aparecem como técnica e economicamente viáveis.

Acompanhando essa tendência, uma análise do potencial da região do Médio Vale do Itajaí para implantação de tais tecnologias foi realizada no capítulo 5. Apesar da disponibilidade dos recursos na região, como radiação solar e velocidade dos ventos, estar presente em níveis mais elevados que em países que são referência em implantação de tecnologias desse tipo de aproveitamento, existem outros fatores que tornam alguns projetos economicamente inviáveis, em comparação com outras tecnologias. Devido à realidade brasileira do ponto de vista tecnológico, ainda se faz necessária a importação de equipamentos e mão-de-obra, o que aumenta os custos consideravelmente. Ainda, o preço das tarifas de energia solar e eólica, em relação

à energia hidrelétrica, são mais caras [54]. Sendo assim a recuperação energética dos resíduos tem destaque no cenário atual, por ser não somente uma tecnologia de aproveitamento energético, mas também uma forma de descarte correto de resíduos, e assim trazer diversos benefícios além da oferta adicional de energia elétrica, como detalhado no capítulo 6.

Outra questão que é importante salientar diz respeito à resistência, por parte de órgãos ambientais, com relação à implantação de sistemas que utilizem a incineração de resíduos, na região de Blumenau. A argumentação está embasada nas emissões de poluentes como a dioxina, que pode trazer riscos para a população caso não sejam evitadas. Mas o que fica evidente é que a tecnologia de contenção dessas emissões existe e é bem sucedida, já que em diversos países ela vem sendo aplicada, sem demais preocupações. Neste caso, cabe ao poder público discutir essas questões e verificar a eficiência dessas tecnologias de filtragem e então dar um parecer mais consistente, com base em análise técnica e científica.

Conforme verificado no andamento deste trabalho, podem-se identificar alguns pontos importantes para que um projeto de recuperação energética possa ser implantado com chances maiores de viabilidade técnica e econômica. A análise das tecnologias existentes, assim como da quantidade e composição dos resíduos disponíveis na região, é essencial. As políticas envolvidas, como a implantação da PNRS 2010 que exige planos de gestão de resíduos por parte dos municípios e regulamenta a responsabilidade compartilhada dos resíduos, também a normatização da venda de energia elétrica produzida por fontes renováveis podem impulsionar a expansão desses conceitos. Vantagens econômicas como linhas de crédito destinadas a investimentos em tecnologias WTE e incentivos fiscais favorecem a viabilidade econômica desses projetos. No entanto, se o funcionamento do sistema de gestão depender da conscientização da população e da separação dos resíduos na fonte, políticas voltadas para a educação ambiental tornam-se primordiais. Fica claro, com base na análise dos casos mostrados na seção 7.2, que mudanças de hábito da população, são fatores decisivos e que estão diretamente vinculados ao sucesso de um plano de gestão que dependa da separação em domicílio. O tempo necessário para que essas mudanças sejam consolidadas não é facilmente estimado. No caso de Borås, na Suécia, foram necessários em torno de 15 anos para que o funcionamento do sistema chegasse ao ponto em que se encontra hoje em dia, mas é preciso começar em algum momento.

8 CONCLUSÃO

Levando em consideração as análises feitas, pode-se concluir que, com os preços atuais de tecnologias de conversão de energias renováveis, a forma mais viável de se realizar a conversão energética na região do Médio Vale do Itajaí é a partir de resíduos sólidos urbanos. As tecnologias apresentadas se encontram em diversos graus de desenvolvimento tecnológico, e existem algumas que estão comercialmente maduras e podem ser implantadas na região, como é o caso das tecnologias de conversão térmica convencional e avançada. Além dos preços e do desenvolvimento tecnológico, outro fator que aponta para a utilização dos resíduos sólidos é a quantidade disponível dos outros recursos renováveis, como radiação solar direta e velocidade média anual de ventos. Estes se apresentam, em parte considerável da região em estudo, em quantidades mais significativas que em países onde os recursos solar e eólico são amplamente exploradas, porém os níveis de disponibilidade são inferiores aos de outras regiões do estado de Santa Catarina, onde as tecnologias vem sendo implantadas. Somando-se essas informações aos preços aplicados, a viabilidade econômica de projetos de conversão de energia eólica e solar na região fica comprometida. Ainda, a quantidade de energia que pode ser produzida com o aproveitamento energético, a partir dos resíduos sólidos urbanos, é considerada significativa, pois no melhor cenário apresentado pode atender a necessidade, em consumo médio por habitantes, de aproximadamente uma cidade como Indaial, Santa Catarina. Porém, a viabilidade de projetos como esses ainda depende da ação conjunta da iniciativa privada, instituições de ensino e governos. Principalmente partindo de políticas públicas voltadas para a gestão integrada de resíduos urbanos, com ênfase na conversão energética. Devido ao fato que a implantação de uma usina de tratamento de resíduos traz não somente o benefício da energia produzida, mas também a eliminação apropriada de resíduos sólidos urbanos, uma classificação diferente de usinas de geração de energia convencionais é um fator que pode impulsionar a expansão na aplicação dessas tecnologias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] <http://www.ceopalmoil.com/2011/10/sustainability-in-aviation-fuel-palm-oil-is-part-of-the-solution/> acessado em 30/01/2012
- [2] <http://ecen.com/content/eee7/motoref.htm> acessado em 02/03/2012
- [3] http://www.mme.gov.br/mme/galerias/arquivos/Artigos/A_crise_do_petroleo_e_os_biocombustiveis.pdf acessado em 13/01/2012
- [4] <http://www.bbc.co.uk/news/business-14201939> acessado em 12/12/2011
- [5] <http://econexos.com.br/panorama-dos-residuos-solidos-brasil-2011-abrelpe> acessado em 10/05/2012
- [6] <http://www.dicionarioweb.com.br/alternativo.html> acessado em 12/12/2012
- [7] DUBLEIN, D. STEINHAUSER, A. *Biogas from Waste and Renewable Resources*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2008. 443p.
- [8] <http://pt.scribd.com/doc/51769248/13/PODER-CALORIFICO> acessado em 23/01/2012
- [9] http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/Agencia8/AG01/arvore/AG01_255_21720039_2410.html acessado em 07/02/2012
- [10] <http://www.etymonline.com/index.php?term=energy> acessado em 10/01/2012
- [11] <http://www.geo.cornell.edu/geology/classes/Chapters/Chapter02.pdf> acessado em 10/01/2012
- [12] http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm acessado em 10/05/2012
- [13] http://www.wwf.org.br/empresas_meio_ambiente/porque_participar/sustentabilidade/ acessado em 12/03/2012
- [14] <http://www.core.org.cn/OcwWeb/Chemical-Engineering/10-391JJanuary--IAP--2007-Spring-2007/CourseHome/index.htm> acessado em 11/05/2012
- [15] http://www.steag.com/fileadmin/vkw/kwe/vpp_menu_01.jpg acessado em 05/05/2012
- [16] <http://www.ballard.com/> acessado em 12/05/2012
- [17] <http://areaseg.com/vote2/html/un.html> acessado em 14/02/2012
- [18] <http://www.ipp.mpg.de/ippcms/de/index.html> acessado em 15/05/2012
- [19] <http://www.volker-quaschnig.de/articles/fundamentals2/index.php> acessado em 03/04/2012

- [20] <http://www.ormatfunding.com/content.php?did=31> acessado em 30/03/2012
- [21] <http://www.solarcell.net.in/> acessado em 03/04/2012
- [22] FITZGERALD, A.E. KINGSLEY JR, C. UMANS, S. D. *Máquinas Elétricas, 6 ed.* - Porto Alegre: Bookman, 2006. 648p.
- [23] <http://www.nrel.gov/> acessado em 29/03/2012
- [24] http://www.bbc.co.uk/portuguese/especial/1931_energia/page4.shtml acessado em 10/04/12
- [25] <http://www.dw.de/dw/article/0,,15351185,00.html> acessado em 22/01/2012
- [26] http://www.bbc.co.uk/portuguese/noticias/2012/03/120310_japao_energia_dg.shtml acessado em 23/01/2012
- [27] <http://www.ncdc.noaa.gov/cmb-faq/anomalies.php#anomalies> acessado em 22/06/2012
- [28] http://articles.cnn.com/2007-07-11/tech/globalwarming.overview_1_average-surface-temperature-warming-united-nations-intergovernmental-panel?_s=PM:TECH acessado em 13/05/2012
- [29] <http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/> acessado em 19/06/2012
- [30] <http://www.theoil Drum.com/story/2005/12/12/18171/178> acessado em 26/01/2012
- [31] http://www.mpoweruk.com/geothermal_energia.htm acessado em 29/01/2012
- [32] <https://www.cia.gov/library/publications/the-world-factbook/rankorder/2178rank.html> acessado em 14/03/2012
- [33] <http://www.tbq.com.br/portalTBGWeb/tbq.portal> acessado em 03/03/2012
- [34] <http://www.hydrocarbons-technology.com/projects/negp/> acessado em 03/03/2012
- [35] http://www.opec.org/opec_web/en/#cont acessado em 25/03/2012.
- [36] <http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/capacidadebrasil.asp> acessado em 31/03/2012
- [37] http://ec.europa.eu/europe2020/reaching-the-goals/targets/index_en.htm acessado em 15/05/2012
- [38] http://www.cefetsp.br/edu/prp/sinergia/complemento/sinergia_2010_n1/pdf_s/segmentos/artigo_15_v11_n1.pdf acessado em 22/02/2012
- [39] <http://www.estadao.com.br/noticias/impresso,energia-renovavel-vira-negocio-de-grandes-investidores,707085,0.htm> acessado em 27/02/2012
- [40] CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS - ELETROBRAS. *Sistema de informação do potencial hidrelétrico brasileiro - SIPOT*. Rio de Janeiro, abr. 2003.

- [41] Trenberth, K. E. and D. P. Stepaniak (2003). *Seamless poleward atmospheric energy transports and implications for the Hadley circulation*. J. Climate 16: 3705-3721.
- [42] http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/energia_solar/energia_solar_no_brasil.html acessado em 21/01/2012
- [43] <http://en.openei.org/wiki/SWERA/Data> acessado em 11/12/2011
- [44] http://www.cresesb.cepel.br/atlas_eolico/index.php acessado em 07/05/2012
- [45] http://www.aneel.gov.br/aplicacoes/noticias/Output_Noticias.cfm?Identidade=5457&id_area=90 acessado em 18/04/2012
- [46] <http://www.cepa.epagri.sc.gov.br/> acessado em 27/02/2012
- [47] <http://www.santacatarinabrasil.com.br/pt/energia-eletrica/> acessado em 17/05/2012
- [48] <http://www.usinasaltopilao.com.br/> acessado em 05/01/2012
- [49] <http://www.greenrhinoenergy.com/solar/radiation/empiricalevidence.php> acessado em 01/12/2011
- [50] Cabral, Sérgio H.L.; MORAES JUNIOR, L. T.; THOMAS, David William Philip. *Realization of Small Scale Renewable Energy through Consideration of the Electrical Engineering Issues*. In: ICEME 2011 - The 2nd International Conference on Engineering and Meta-Engineering, 2011, Orlando, FLA. Winter Garden, FLA : IIS - International institute of Informatics and Systemics, 2011. v. 1. p. 22-27.
- [51] http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/ppm/2010/tabelas_pdf/tab18.pdf acessado em 03/01/2012
- [52] <http://www.biodieselbr.com/energia/residuo/energia-do-arroz.htm> acessado em 17/01/2012
- [53] <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1> acessado em 10/02/2012
- [54] http://www.gsep.ene.unb.br/producao/marco/sbpe_2006.pdf acessado em 19/12/2011
- [55] <http://www.crea-sc.org.br/portal/index.php?cmd=artigos-detalle&id=1197> acessado em 30/11/2011
- [56] Manders, J. “*Confederation of European Waste-to-Energy Plants (CEWEP) Study: The Renewable Energy Contribution from Waste Across Europe*.” Presented at ISWA Dakofa Conference, December 3, 2009.
- [57] U.S. Environmental Protection Agency (EPA). *Municipal Solid Waste Generation, Recycling, and Disposal in the United States: Facts and Figures for 2008*. EPA-530-F-009-021.

- [58] http://www.powermag.com/renewables/waste_to_energy/Waste-to-Energy-Technology-Options-Increase-but-Remain-Underutilized_4497.html acessado em 22/11/2011
- [59] Psomopoulos C.S., Bourka A., Themelis N.J. “*Waste-to-Energy: A review of the status and benefits in USA.*” 2009. Waste Management, 29, 1718-1724.
- [60] <http://www.epa.gov/lmop/> acessado em 19/01/2012
- [61] Kaplan P.O., Decarolis J., Thorneloe, S. (2009). “*Is it better to burn or bury waste for clean electricity generation?*” Environ. Sci. Technol., 43, 1711-1717.
- [62] Rigamonti L., Grosso M., Giugliano M. (2009). “*Life cycle assessment for optimising the level of separated collection in integrated MSW management systems.*” Waste Management, 29, 934–944.
- [63] <http://www.energyfromwaste.ca/energy/Sustainable-Energy-From-Waste> acessado em 31/03/2012
- [64] http://my.epri.com/portal/server.pt?space=CommunityPage&cached=true&parentname=ObjMgr&parentid=2&control=SetCommunity&CommunityID=404&RaiseDocID=0000000001022361&RaiseDocType=Abstract_id acessado em 20/05/2012
- [65] <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890499001557> acessado em 31/10/2011
- [66] http://www.unep.or.jp/ietc/publications/spc/solid_waste_management/vol_i/18-chapter12.pdf acessado em 29/03/2012
- [67] Baidoo, R.R. *Energy and economic analysis of closed-loop plasma waste-to-power generation model and in comparison with Incineration and Micro-Turbine Models.* Electrical Power & Energy Conference (EPEC), 2009 IEEE.
- [68] http://www.cleanenergycouncil.org/files/Themelis_WMW_2007.pdf acessado em 10/04/2012
- [69] <http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/sofos/nawtec/nawtec11/nawtec11-1682.pdf> acessado em 07/12/2011
- [70] Sithan, M. *Application of green technologies in developing countries — Reduced carbon emission and conservation of energy.* Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE.
- [71] <http://www.infoplease.com/jpa/A0934666.html> acessado em 12/04/2012
- [72] http://www.me-le-biogas.com/cms/index.php?option=com_content&view=article&id=3&Itemid=5&lang=en acessado em 15/07/2011

- [73] <http://www.ammvi.org.br/home/> acessado em 26/04/2012
- [74] <http://www.samae.com.br/> acessado em 05/05/2012
- [75] <http://www.momentoambiental.com.br/site/inicial/index.asp> acessado em 10/04/12
- [76] <http://www.ovvd.de/style-ovvd/home-237-0-67.html> acessado em 18/05/2012
- [77] <http://www.evg-mba-rostock.de/> acessado em 18/05/2012
- [78] <http://www.Boråsenergimiljo.se/> acessado em 18/05/2012
- [79] <http://www.turbinesinfo.com/steam-turbine-efficiency/> acessado em 03/03/2012.
- [80] http://web.mit.edu/5.33/www/expt4_05.pdf acessado em 22/03/2012
- [81] http://www.opec.org/opec_web/static_files_project/media/downloads/publications/MOMR_May_2012.pdf acessado em 02/04/2012
- [82] <http://www.worldclimatereport.com/index.php/2006/03/21/solar-warming/> acessado em 19/01/2012
- [83] <http://news.discovery.com/earth/volcanoes-co2-people-emissions-climate-110627.html> acessado em 24/03/2012
- [84] <http://www.nature.com/news/2007/070723/full/news070723-4.html> acessado em 30/04/2012