



TECNOLOGIAS DE BAIXO CARBONO APLICÁVEIS AOS SETORES-CHAVE DO BRASIL

GESTÃO DE RESÍDUOS

Luiz Gustavo Silva de Oliveira, MSc.

Março de 2015



Esse material objetiva a capacitação acerca das metodologias empregadas no projeto “Opções de mitigação de emissões de GEE em setores-chaves do Brasil”. Portanto, seu conteúdo não expressa resultados do projeto.



SUMÁRIO

1. Caracterização do Setor
 - 1.1 Produção
 - 1.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos
 - 1.1.2 Efluentes
 - 1.1.3 Agropecuários
 - 1.2 Consumo de Energia
 - 1.3 Emissões de GEE
2. Medidas de Abatimento
 - 2.1 Resíduos Sólidos Urbanos
 - 2.2 Efluentes
 - 2.3 Resíduos Agropecuários
 - 2.4 Usos do Biogás
3. Processo decisório
 - 3.1 Metodologia do Custo de Abatimento
 - 3.2 Especificidades das medidas de abatimento no setor
 - 3.3 Medidas de Abatimento



1. Caracterização do Setor

A DEFINIÇÃO DO SETOR É DADO POR DOIS GRANDES MARCOS REGULATÓRIOS:

- Política Nacional de Resíduos Sólidos - Lei nº 12.305/2010**
 - Resíduos Sólidos são: materiais descartados resultantes das atividades humanas (Resíduos Sólidos Urbanos, da Construção Civil, Industriais, de Transporte, de Serviços de Saúde, de Mineração, e Agrosilvopastoris)
- Política Nacional de Saneamento Básico - Lei nº 11.445/2007**
 - Abastecimento de água e esgotamento sanitário (doméstico e industrial caso características sejam semelhantes ao doméstico)

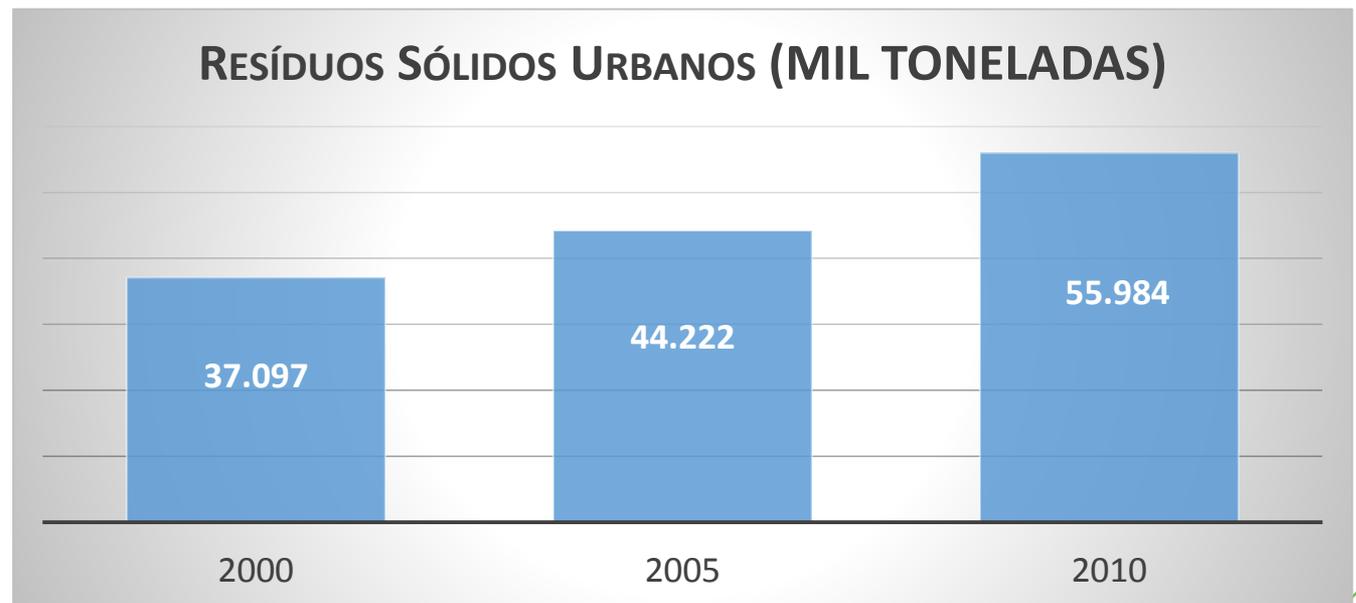
O INVENTÁRIO BRASILEIRO DE EMISSÕES TRATA A GESTÃO DE RESÍDUOS EM DOIS SETORES:

- Agropecuário:**
 - Manejo de dejetos de animais
 - Queima de Resíduos Agrícolas
 - Emissões de N₂O de provenientes de solos agrícolas (resíduos vegetais deixados no campo)
- Tratamento de Resíduos**
 - Disposição de Resíduos Sólidos
 - Tratamento de Efluentes

1. Caracterização do Setor

1.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos - Produção

Resíduos Sólidos Urbanos coletados, não contabiliza resíduos industriais, de serviço da saúde e de construção civil. Somente resíduos domiciliares e públicos.





1. Caracterização do Setor

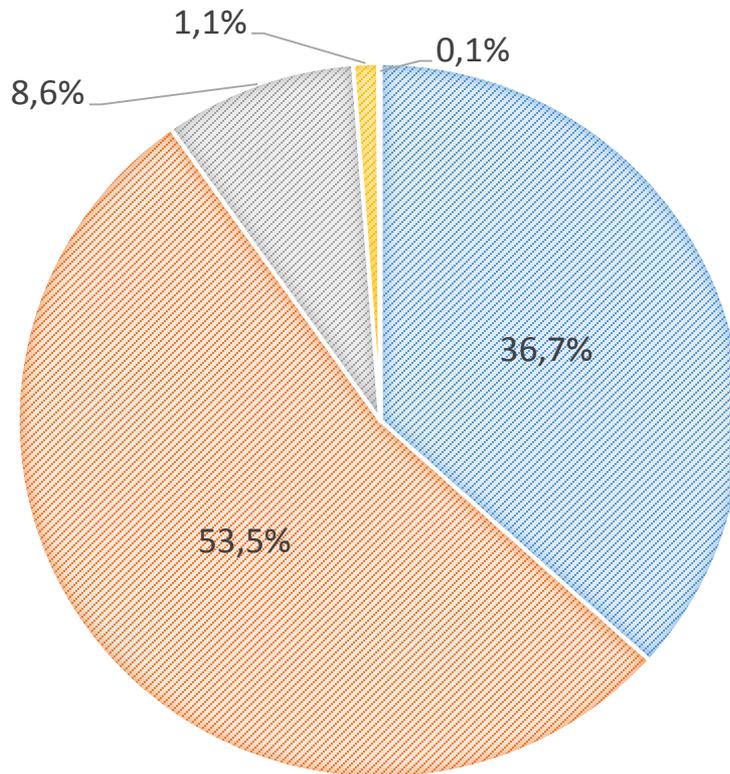
1.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos - Composição

Resíduos	Participação (%)	Quantidade (t/dia)
Material reciclável	31,9	58.527,40
Metals	2,9	5.293,50
Aço	2,3	4.213,70
Alumínio	0,6	1.079,90
Papel, papelão, tetrapack	13,1	23.997,40
Plástico total	13,5	24.847,90
Vidro	2,4	4.388,60
Matéria Orgânica	51,4	94.335,10
Outros	16,7	30.618,90
Total	100,0	183.481,50

1. Caracterização do Setor

1.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos - Matriz de disposição final

■ Lixão ■ Aterros Sanitários ■ Aterros Controlados ■ Reciclagem ■ Compostagem



1. Caracterização do Setor

1.1.1 Resíduos Sólidos Urbanos - Condicionantes

☐ DIRETAS

População - a produção de RSU é diretamente proporcional a população urbana.

Renda per capita - a composição dos RSU é consequência do padrão de consumo de uma população, quanto mais rica mais recicláveis.

☐ INDIRETAS

Segregação na fonte - separação de resíduo orgânico e recicláveis para diferentes tipos de coleta e triagem

Coleta Seletiva - a implantação ou não de coleta seletiva indica disposições finais diferentes.

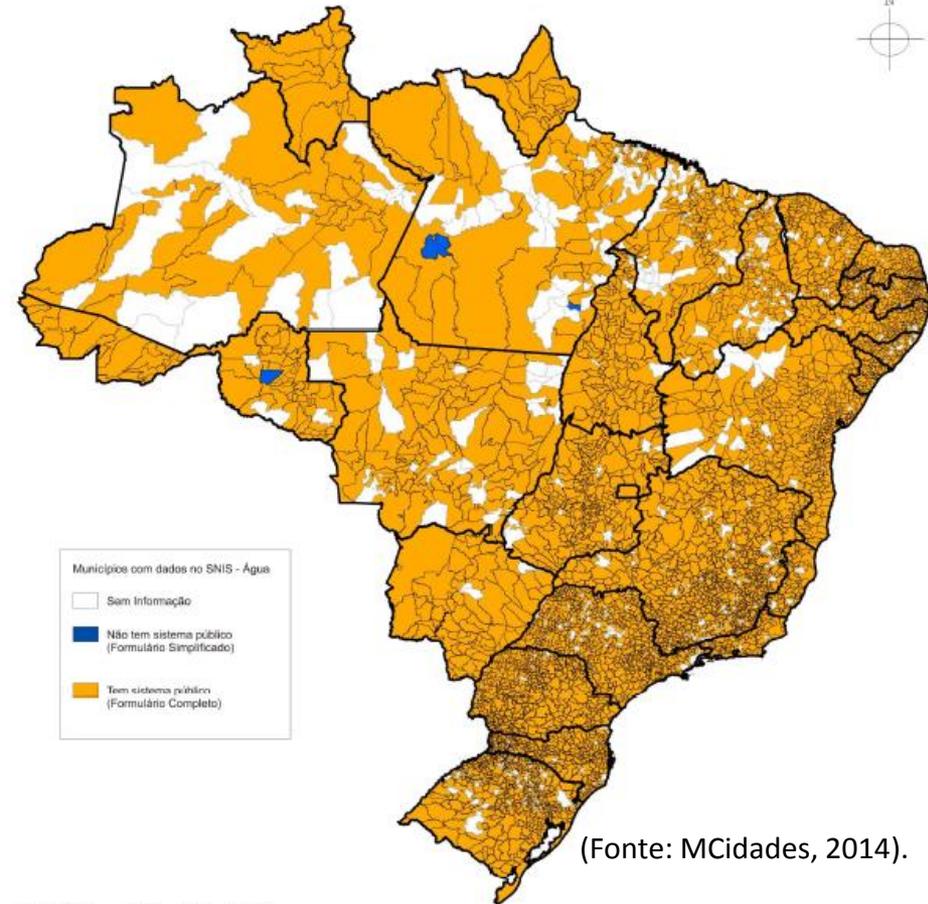
Taxa de atendimento da coleta - universalização da coleta reduz vazadouros.

1. Caracterização do Setor

1.1.2 Efluentes - Produção

Abastecimento de água no Brasil em 2012 (dados SNIS):

- 5.064 municípios com sistemas públicos de água (91,0% do total).
- Total de 160,4 milhões de habitantes atendidos no país (97,8% da amostra).
- Meta PLANSAB: 100% de atendimento urbano com sistemas de água até 2020.

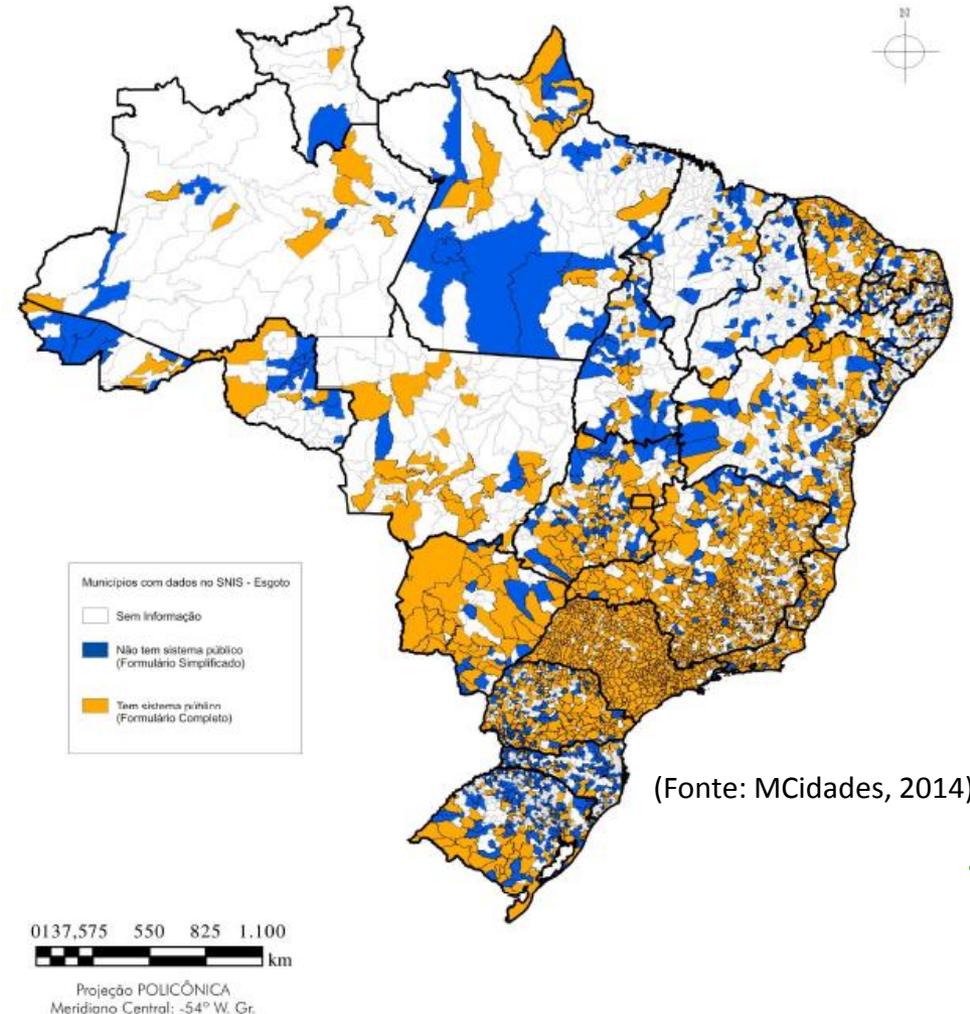


1. Caracterização do Setor

1.1.2 Efluentes - Produção

Coleta de esgotos no Brasil em 2012 (dados SNIS):

- 2.221 municípios com sistemas públicos de esgotos (39,9% do total).
- 1.427 municípios sem sistemas públicos de esgotos (25,6% do total).
- 1.922 cidades não responderam (34,5% do total).
- Total de 135,4 milhões de habitantes atendidos no país (91,0% da amostra);
- Meta PLANSAB: 93% de atendimento urbano com rede coletora de esgotos até 2033.



1. Caracterização do Setor

1.1.2 Efluentes - Produção

Região	Índice de Atendimento com Rede (%)				Índice de Tratamento dos Esgotos (%)	
	Água		Coleta de Esgotos		Esgotos Gerados	Esgotos Coletados
	Total	Urbano	Total	Urbano	Total	Total
Norte	55,2	68,6	9,2	11,9	14,4	85,1
Nordeste	72,4	89,5	22,2	29,4	31,0	81,2
Sudeste	91,8	97,0	75,5	80,3	42,7	63,6
Sul	87,2	97,2	36,6	42,7	36,2	79,7
Centro-Oeste	88,0	96,5	42,7	47,1	44,2	90,0
Total Brasil	82,7	93,2	48,3	56,1	38,7	69,4

(Fonte: MCidades, 2014)



1. Caracterização do Setor

1.1.2 Efluentes - Condicionantes

❑ DIRETAS

População - a produção de efluentes é diretamente proporcional a população urbana.

Atividade Industrial - os efluentes industriais dependem da atividade do respectivo setor.

❑ INDIRETAS

Taxa de atendimento do sistema de coleta - o acesso ao sistema de tratamento de efluentes é influencia a decisão do tipo de tratamento.

Portfólio de tratamento - a matriz de tecnologias e processos definem consumo energético e emissões.

1. Caracterização do Setor

1.1.3 Resíduos Agropecuários - Produção

Resíduos Agrícolas



Os resíduos agrícolas considerados são somente os da fase de campo da produção, ou seja, não estão contabilizados os resíduos consequentes de algum beneficiamento agroindustrial. Basicamente palhas e pontas.

Os resíduos da pecuária considerados são somente os dejetos da criação de animais, seja esta confinada ou não. Também não são considerados qualquer outro tipo de efluente ou resíduos da fase agroindustrial.

Resíduos da Pecuária





1. Caracterização do Setor

1.1.3 Resíduos Agropecuários - Composição

Resíduos das culturas de soja, milho e cana-de-açúcar representam a maior parte dos resíduos agrícolas

Composição Matriz Resíduos Agrícola	2000	2005	2010
Palha de arroz	8,0%	7,0%	4,1%
Palha de cana	29,4%	28,0%	32,7%
Palha de milho	25,2%	20,2%	21,9%
Palha de soja	35,1%	40,2%	37,2%
Palha de trigo	2,3%	4,6%	4,2%

Apesar do resíduo do rebanho bovino representar cerca de 80% dos dejetos de animais, os principais emissores de GEE são os dejetos de rebanhos confinados.

Composição Matriz Resíduos da Pecuária	2000	2005	2010
Esterco avícola	9,5%	9,3%	11,1%
Esterco suíno	2,5%	2,2%	2,4%
Esterco de bovino	79,7%	80,5%	78,0%
Esterco de bovino de leite	8,4%	8,0%	8,5%



1. Caracterização do Setor

1.1.3 Resíduos Agropecuários - Condicionantes

DIRETAS

Produção agrícola e pecuária - os resíduos são contabilizados por indicadores da produção agropecuária.

INDIRETAS

Grau de confinamento - influencia na distribuição dos resíduos, conseqüentemente no tipo de tratamento dado aos mesmos.

Tipo de colheita agrícola - influencia na distribuição e na possibilidade ou não do uso destes resíduos.

1. Caracterização do Setor

1.2 Consumo de Energia

☐ RSU - principal consumo energético reside na fase da coleta.

Tipo de veículo para coleta de RSU	Quantidade por tipo de veículo	Consumo específico [l/h]	Jornada anual [h]	Consumo total de óleo diesel [l/ano]
Caminhões	18.691	6,21	5.840	677.855.282
Tratores	2.443	1,0	2.920	7.133.560
Embarcações	212	1,0	2.920	619.040

1,4% do consumo de diesel nacional





1. Caracterização do Setor

1.2 Consumo de Energia

Efluentes - principais consumos energéticos residem nos sistemas de bombeamento

Consumo anual de eletricidade	Abastecimento de Água	Tratamento de Esgoto	Consumo Total do Segmento Saneamento
Ano 2012	10.877 GWh	1.073 GWh	11.951 GWh

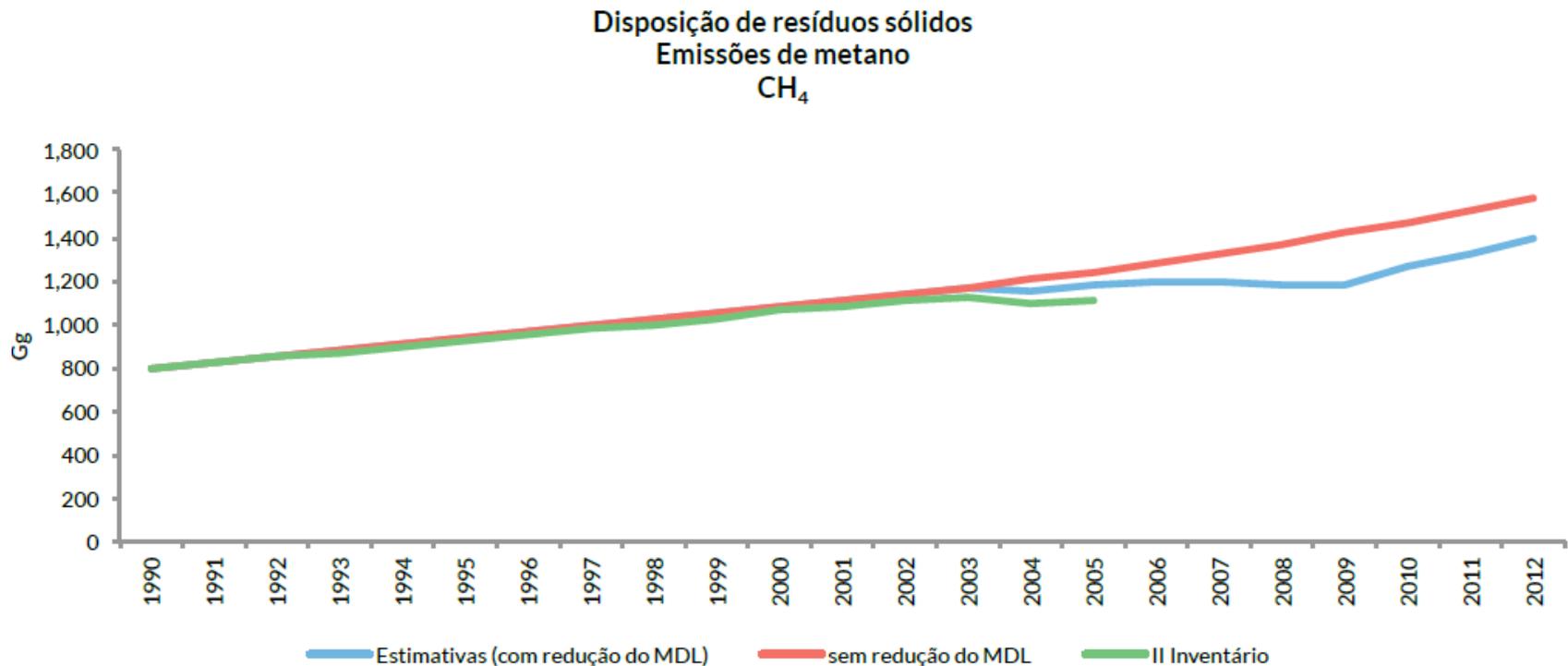
Nível de atendimento da rede de abastecimento de água em áreas urbanas no Brasil	Registrado em 2012	Estimado para meta PLANSAB
	93,2%	100%
Consumo de eletricidade	10.877 GWh	11.670 GWh

Aproximadamente
5% do consumo de
eletricidade
nacional

Nível de atendimento da rede de coleta de esgoto em áreas urbanas no Brasil	Registrado em 2012	Estimado para meta PLANSAB
	56,1%	93%
Consumo de eletricidade	1.073 GWh	1.779 GWh

1. Caracterização do Setor

1.3 Emissões de GEE - RSU: disposição final.

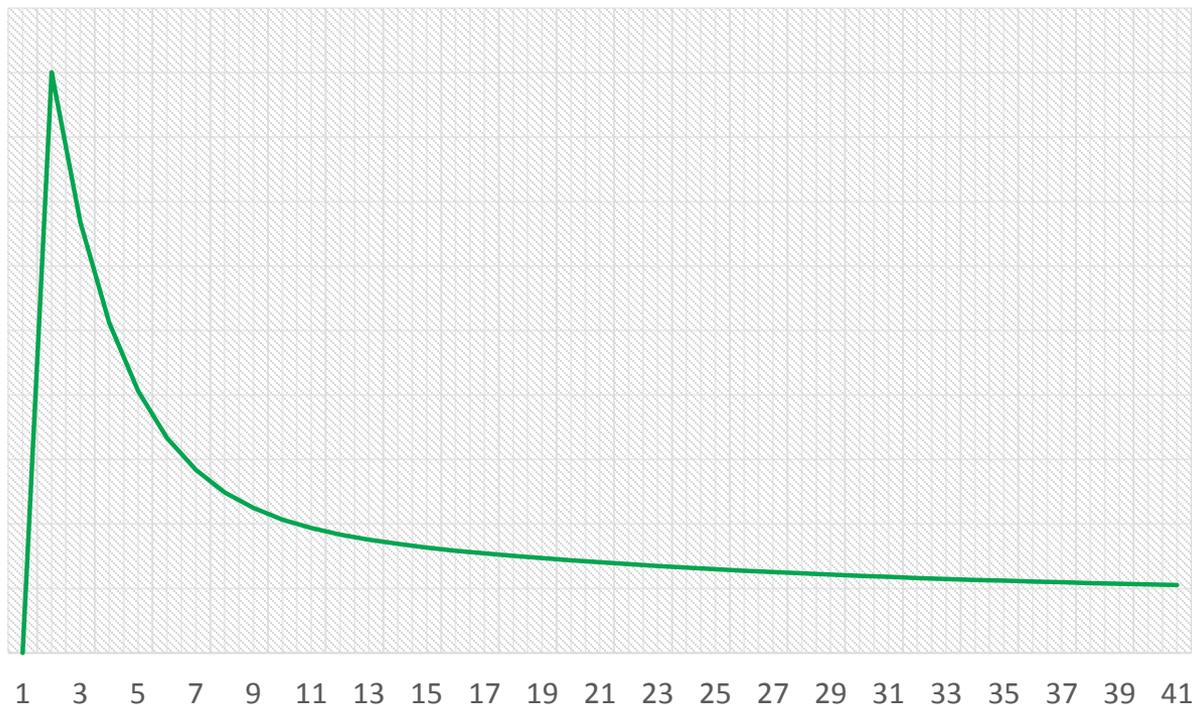


1. Caracterização do Setor

1.3 Emissões de GEE - RSU: _disposição final (emissões em aterros)

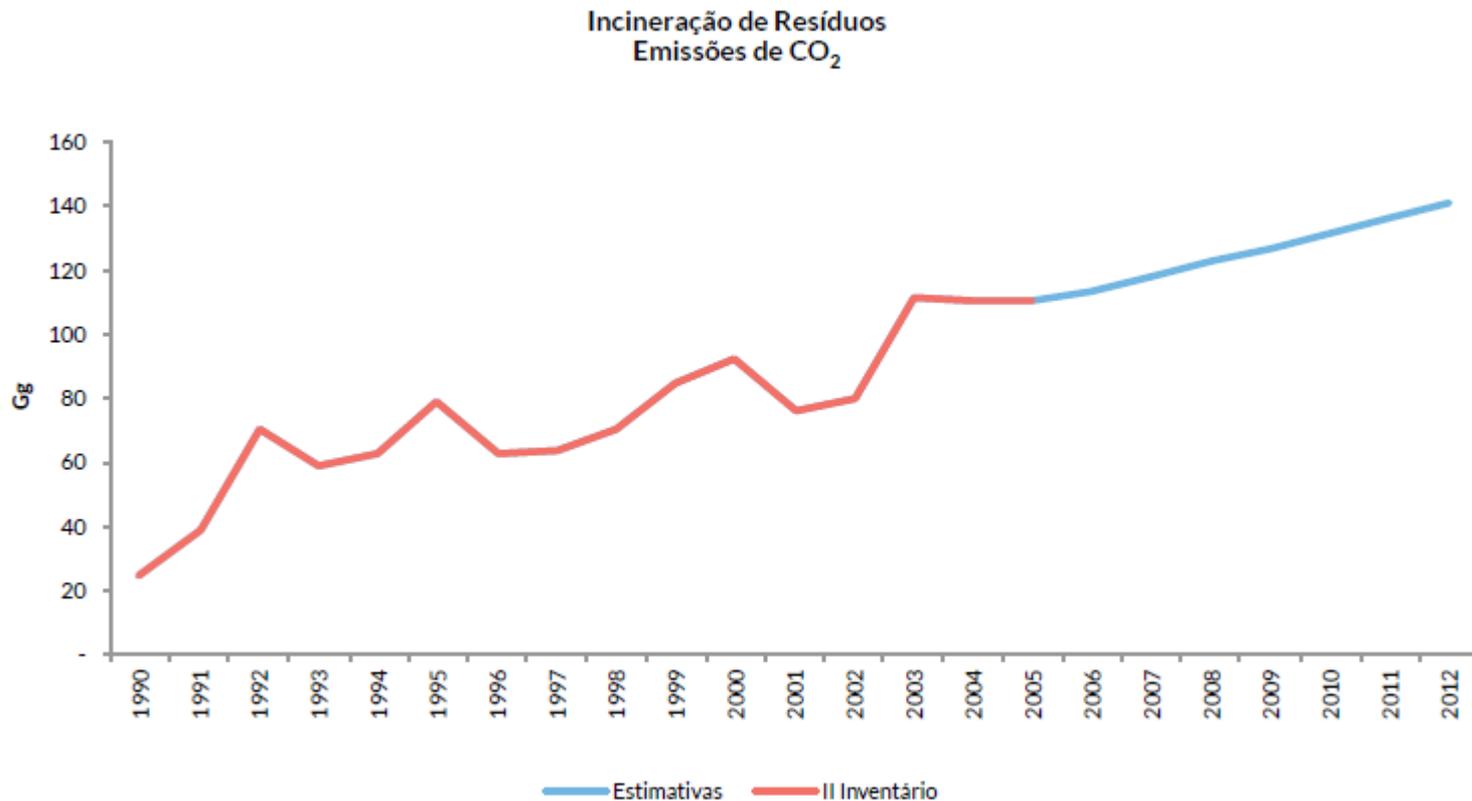
As emissões de metano em aterro decorrentes da decomposição da matéria orgânica ocorrem significativamente no anos seguintes a disposição dessa matéria orgânica, os 10 primeiros anos correspondem a 80% das emissões.

O IPCC elaborou uma ferramenta para calcular as emissões de metano por conta da disposição final no solo: IPCC Waste Model.



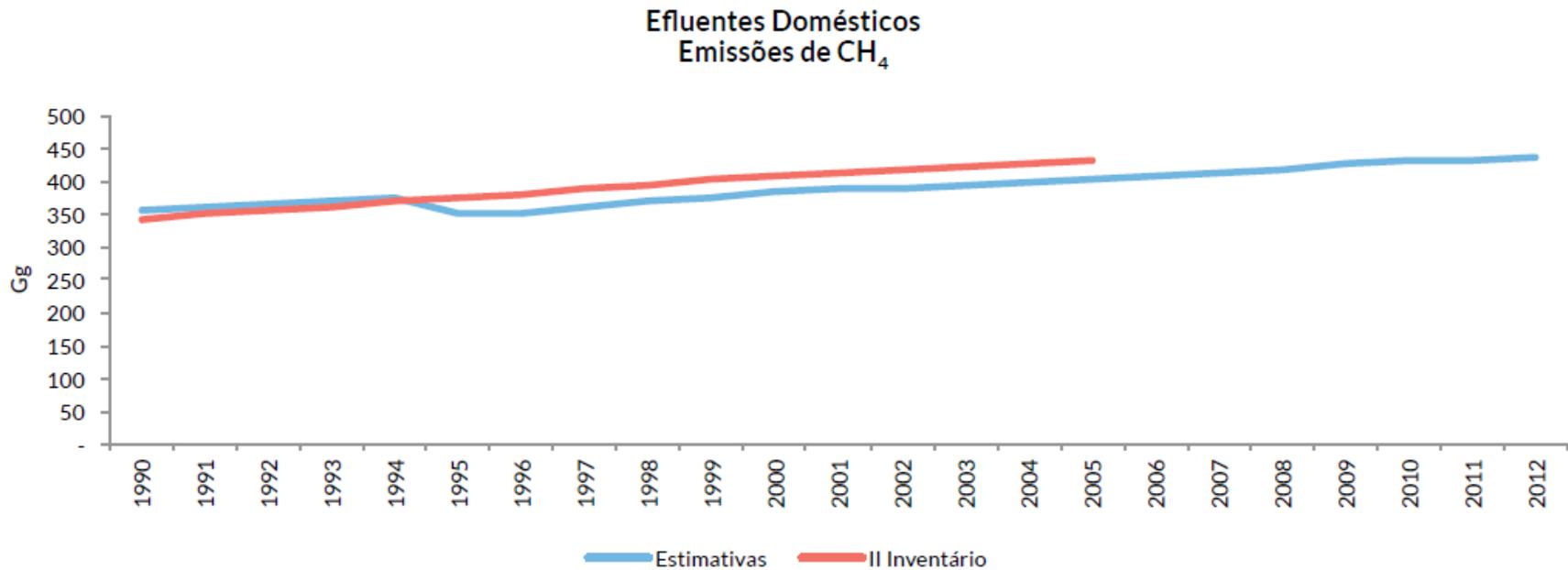
1. Caracterização do Setor

1.3 Emissões de GEE - RSU: incineração.



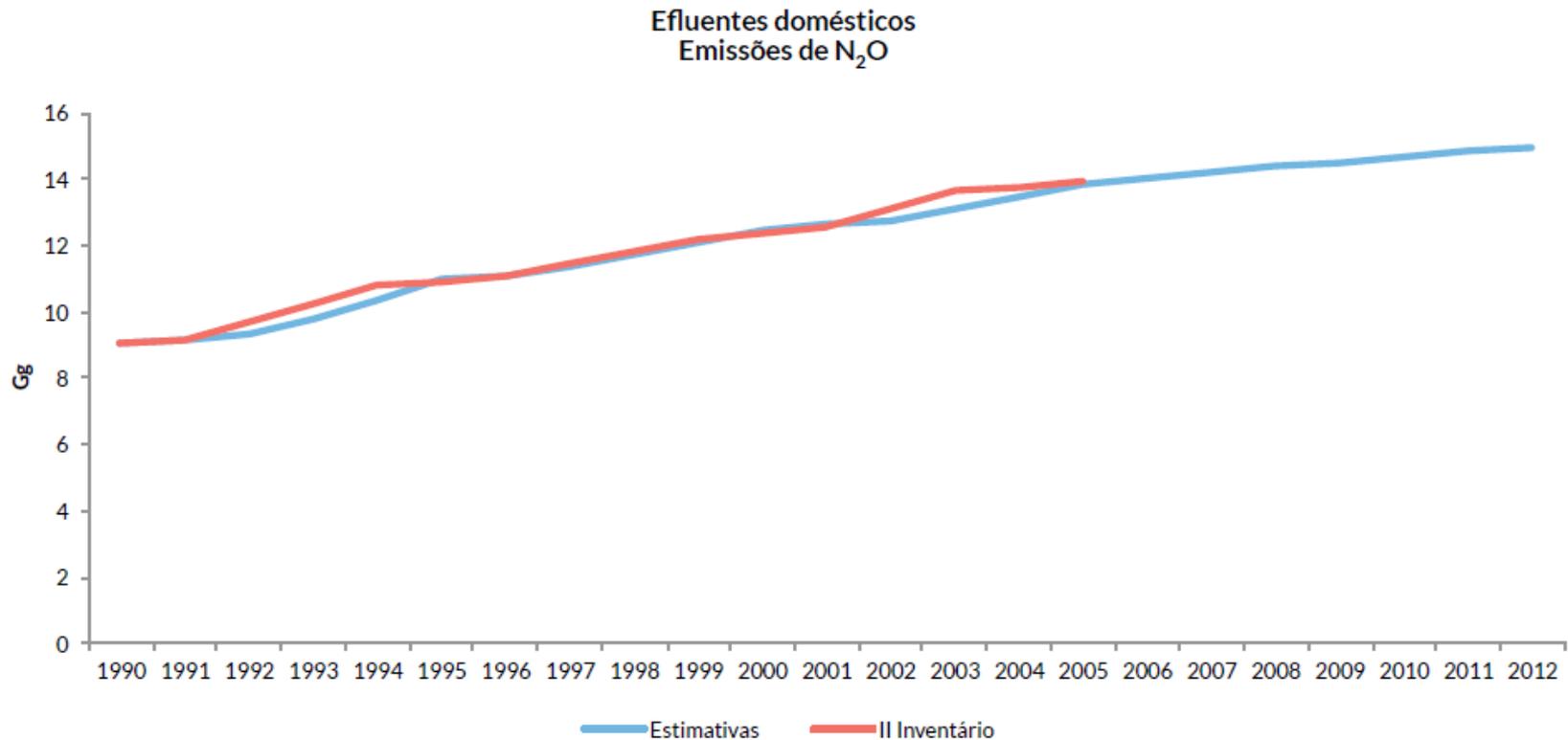
1. Caracterização do Setor

1.3 Emissões de GEE - Efluentes: tratamento CH₄



1. Caracterização do Setor

1.3 Emissões de GEE - Efluentes: tratamento N₂O.



1. Caracterização do Setor

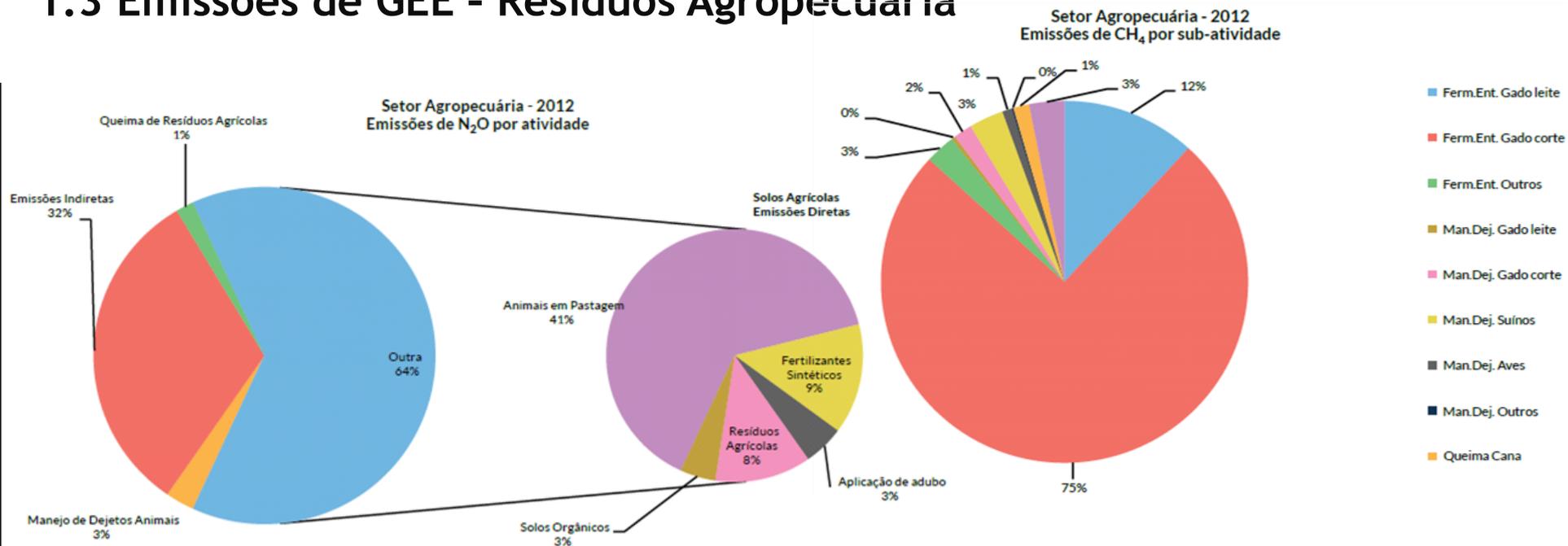
1.3 Emissões de GEE - Emissões Resíduos Urbanos: evolução.

Gás	Fonte	1990	1995	2000	2005	2011	2012
		Gg					
CO ₂	II Inventário	24,4	78,8	91,8	109,9		
	Estimativas	24,4	78,8	91,8	109,9	136,1	140,6
CH ₄	II Inventário	1.227,30	1.455,00	1.657,60	1.743,30		
	Estimativas	1.249,30	1.438,10	1.645,70	1.784,50	2.066,80	2.142,7
N ₂ O	II Inventário	9	10,9	12,4	14		
	Estimativas	9	10,9	12,4	13,9	14,8	15



1. Caracterização do Setor

1.3 Emissões de GEE - Resíduos Agropecuária



Gás	Fonte	1990	1995	2000	2005	2011	2012
		Gg					
CH ₄	II Inventário	9.539	10.447	10.772	12.768	-	-
	Estimativas	9.539	10.447	10.772	12.767	13.399	13.270
N ₂ O	II Inventário	334	375	393	476	-	-
	Estimativas	334	375	393	476	543	541

1. Caracterização do Setor

1.3 Emissões de GEE - Resíduos Agropecuária

2012 – Gg	CH ₄	N ₂ O	CO ₂ eq
Queima de Resíduos	133	5	5.144
Manejo de Dejetos	823	16	27.321



1. Caracterização do Setor - Referência e fontes de dados

- ABRELPE. Atlas Brasileiro de Emissões de GEE e Potencial Energético na Destinação de Resíduos Sólidos. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE EMPRESAS DE LIMPEZA PÚBLICA E RESÍDUOS ESPECIAIS. São Paulo. 2013.
- Base de Dados Sidra (Produção Agropecuária) IBGE - <http://www.sidra.ibge.gov.br/>
- EPE – Empresa de Pesquisa Energética. “Balanço Energético Nacional 2014 – ano base 2013”. Rio de Janeiro: EPE, 2014 - <https://ben.epe.gov.br/>
- FUNDAÇÃO INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). *Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB / 2008*. IBGE, Rio de Janeiro, 2010.
- Guidelines IPCC 2006 (metodologia de cálculo de emissões de GEE) - <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>
- <http://www.agrale.com.br/pt/imprensa/noticias/detalhes/153/agrale-expoe-suas-linhas-de-tratores-na-coopavel-2007#U9bqeuNdU6x>>
- IPEA – Instituto de Pesquisa Econômica e Aplicada. Diagnóstico de Resíduos Sólidos Urbanos, Brasília, 2012.
- LINO, F. A. M. 2009. Consumo de Energia no Transporte da Coleta Seletiva de Resíduo Sólido Domiciliar no Município de Campinas (SP). Dissertação de M. Sc. FEM/PSE: Campinas.
- MCIDADES –Ministério das Cidades. “Plano Nacional de Saneamento Básico – PLANSAB”. Brasília: MCidades, 2013.
- MCIDADES –Ministério das Cidades. 2014. Diagnóstico do Manejo de Resíduos Sólidos Urbanos – 2012. Brasília: MCidades, 2014.
- MCTI, 2012. *Segunda Comunicação Nacional do Brasil à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima*. Disponível em: MCTI / <http://www.mct.gov.br/index.php/content/view/321144.html#ancora>
- MCTI, 2013. *Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil*. Disponível em: <http://gvces.com.br/arquivos/177/EstimativasClima.pdf>
- Notas Técnicas de Aproveitamento Energético de Resíduos (Indicadores de produção de Resíduos Agropecuários) - http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Estudos_27.aspx
- Panorama ABRELPE - <http://www.abrelpe.org.br/>
- PROCEL – Programa Nacional de Conservação de Energia Elétrica. “Relatório de Resultados do Procel 2013 – ano base 2012”. Rio de Janeiro: Procel, 2013.
- SNIS (Sistema Nacional de Informação sobre Saneamento) - <http://www.snis.gov.br/>



Medidas de Abatimento das Emissões de GEE na Gestão de Resíduos



2. Medidas de Abatimento

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos (RSU)

- Bcover em aterros
- Queima de biogás de aterros em flare
- Aproveitamento Energético de biogás de aterros
- Incineração de RSU com recuperação energética
- Biodigestão de RSU e aproveitamento do biogás
- Compostagem da fração orgânica do RSU
- Reciclagem
- Redução da produção de RSU

2.2 Efluentes

- Aproveitamento do biogás de UASB (Upflow Anaerobic Sludge Blanket - RAFA, Reator Anaeróbico de Fluxo Ascendente)
- Aproveitamento de biogás de UASB + biodigestão do lodo
- Redução de Perdas e Eficiência Energética

2.2 Resíduos da Agropecuária

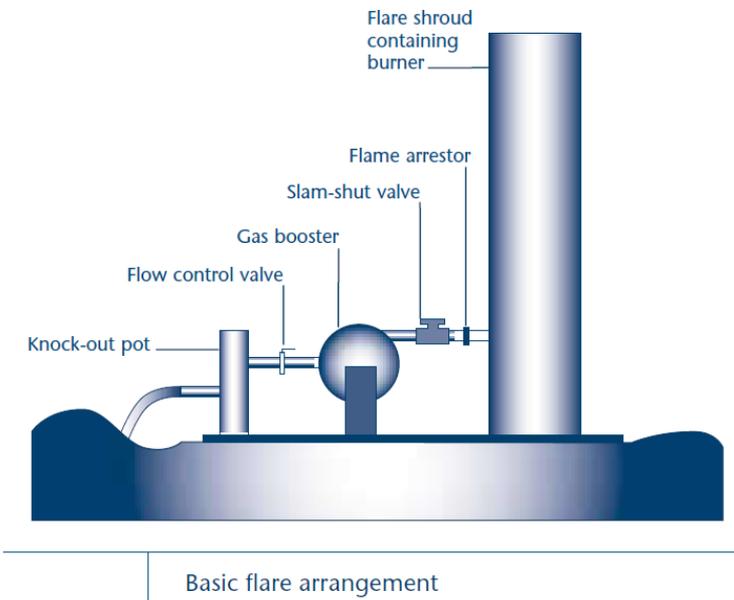
- Aproveitamento Energético de Resíduos Agrícolas (Combustão, Gasificação, Biodigestão)
- Biodigestão de Resíduos da Pecuária

2. Medidas de Abatimento

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

- **Captura de Metano de aterro e queima em flare** - Oxidação do metano através da combustão em flare.

Emissões evitadas: depende da composição do material aterrado e da vida útil do aterro. IPCC (2014) sinaliza algo em torno de 0,1 a 1,9 t de $\text{CO}_{2\text{eq}}$ /t de RSU.



O principal objetivo dessa medida é a mitigação de emissões através da degradação do metano em dióxido de carbono.

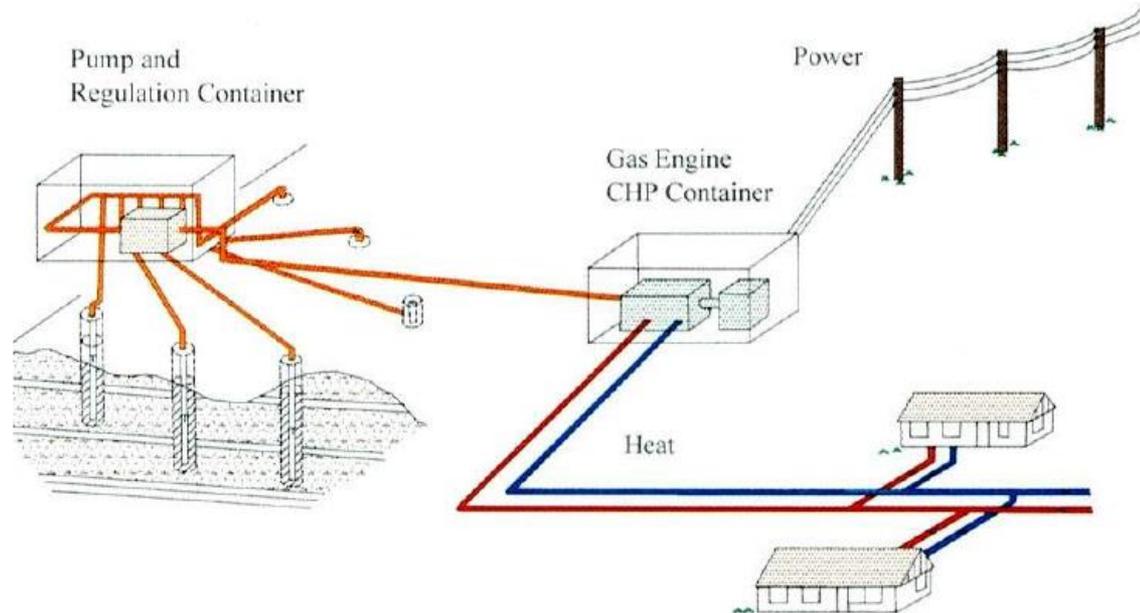
Essa medida é vantajosa no que se refere a custo de investimento, pois apresenta somente o custo do sistema de captura e queima do metano.

2. Medidas de Abatimento

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

- **Aproveitamento Energético de biogás de Aterro - Recuperação do biogás e aterro e aproveitamento energético.**

De maneira similar à medida anterior, a recuperação de biogás de aterro com aproveitamento energético tem como objetivo a degradação do metano em dióxido de carbono somada a substituição de um energético como formas de mitigação de emissões de GEE



O aproveitamento energético do biogás pode ser realizado através de diferentes formas de conversão: geração de eletricidade, cogeração, e produção de biometano para substituição de combustíveis fósseis



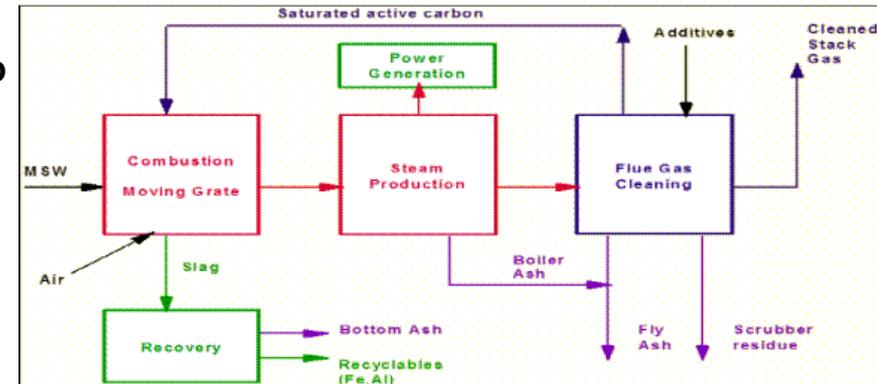
2. Medidas de Abatimento

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

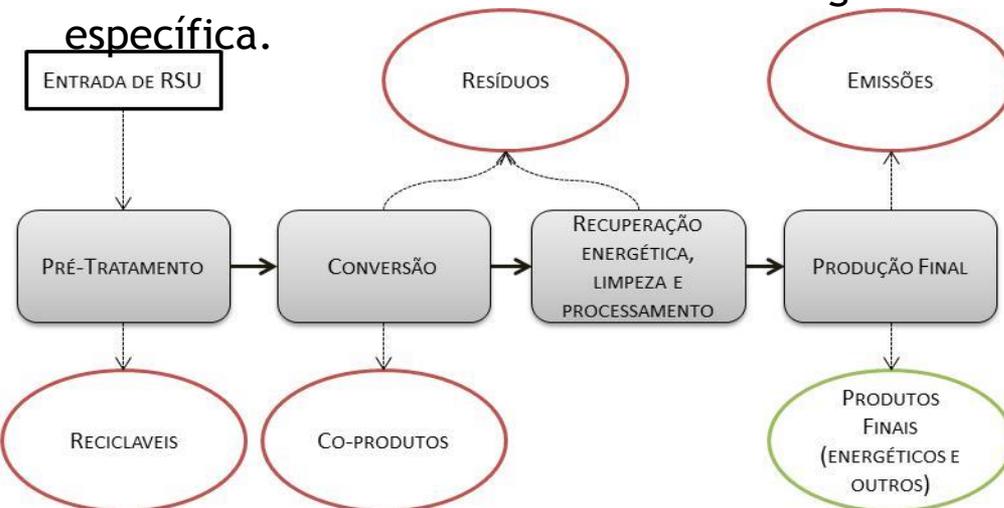
- Incineração de RSU com Aproveitamento Energético

A incineração de RSU corresponde a combustão dos mesmos ou de CDR (Combustível Derivado de Resíduos) de maneira a evitar a disposição final desses resíduos.

Apesar do esquema tecnológico ser bastante similar a uma termelétrica, devido a característica do resíduos a tecnologia da câmara de combustão e tratamento de gases é específica.



A mitigação de emissões de GEE é consequência da não disposição final de matéria orgânica no solo e do energético substituído. Contudo, devido a queima de materiais fósseis há emissões de dióxido de carbono fóssil, o que diminui a o potencial de mitigação. Assim, o potencial de emissões varia muito de acordo com a composição dos RSU e a disposição final de linha de base.



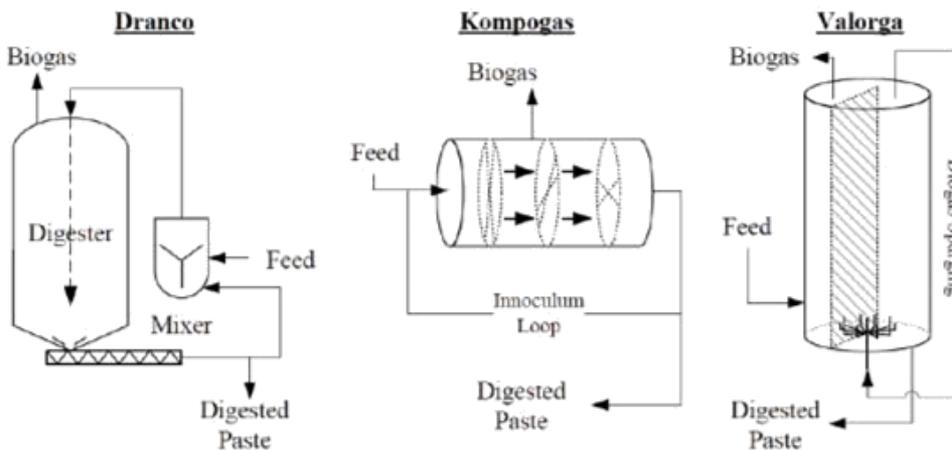
2. Medidas de Abatimento

2.1 Resíduos Sólidos Urbanos

■ Biodigestão Anaeróbica de RSU

A biodigestão de RSU corresponde a degradação da matéria orgânica disponível nesses resíduos com a produção de biogás evitando a disposição final desses resíduos no solo.

A produção de biogás e o nível de segregação dos resíduos variam de acordo com o esquema tecnológico adotado.



A mitigação de emissões de GEE é consequência da não disposição de matéria orgânica no solo, e a não produção de metano, e do energético substituído pelo biogás.



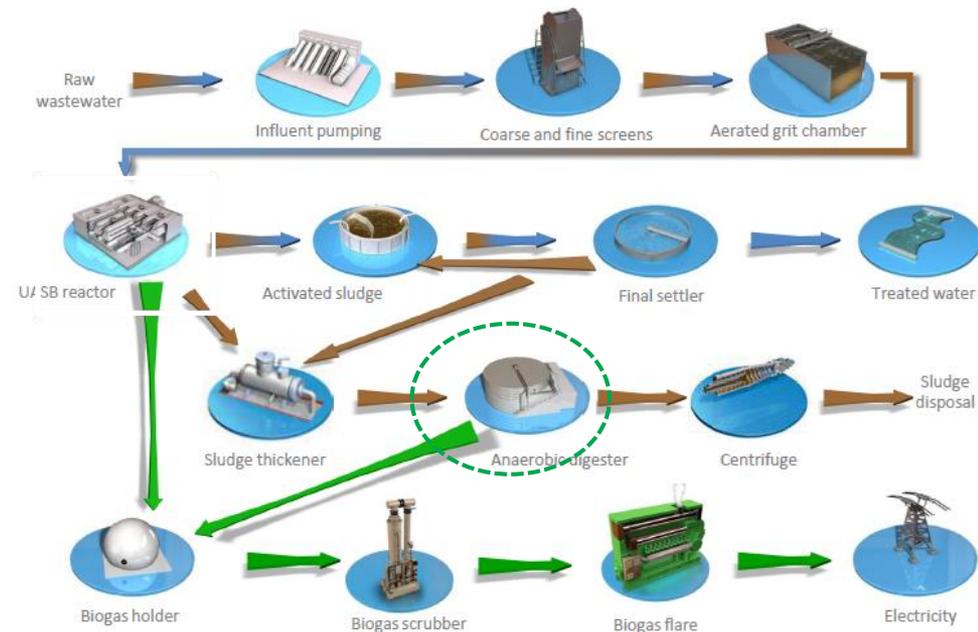
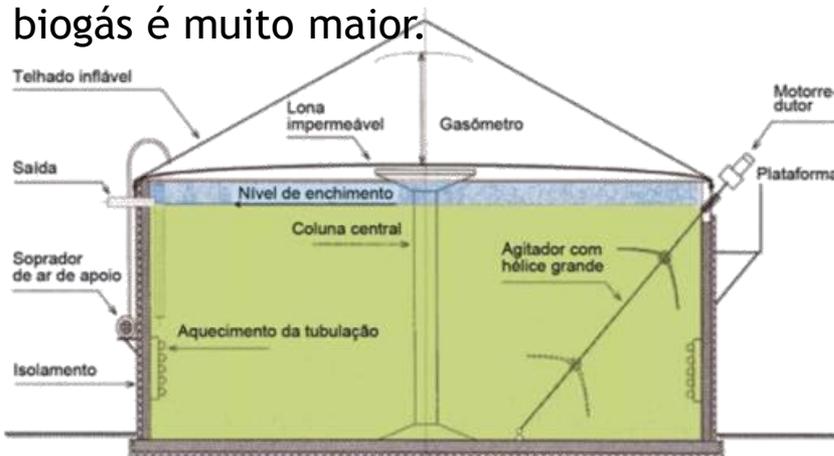
2. Medidas de Abatimento

2.2 Efluentes

- **Recuperação do biogás e Biodigestão do lodo** - Recuperação do biogás produzido no reator UASB + biodigestão anaeróbica

Essa medida corresponde a recuperação energética do biogás produzido no tratamento em ETE com UASB, mais instalação de um biodigestor para o lodo com recuperação energética do biogás produzido.

Dada a concentração do lodo, matéria não diluída como no UASB, a produtividade de biogás é muito maior.



Emissões evitadas: emissões de metano do tratamento de esgotos e na disposição final do lodo mais emissões evitadas do energético substituído pelo biogás. Também muito dependentes dos casos específicos.

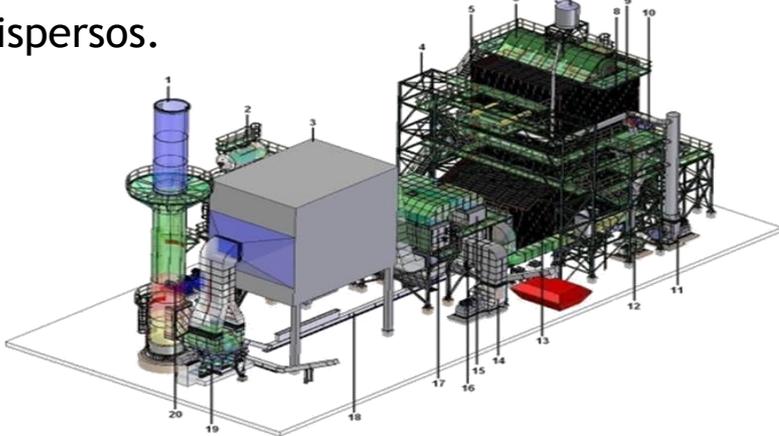
2. Medidas de Abatimento

2.3 Resíduos Agropecuários

- **Combustão de resíduos agrícolas** - Queima em ciclo rankine para geração de calor e/ou eletricidade

A combustão de resíduos agrícolas RSU corresponde a combustão dos mesmos (combustão de biomassa) para recuperação energética na forma de calor e/ou eletricidade..

A tecnologia é totalmente dominada, sendo a questão logística o fator mais importante na fase de decisão por essa alternativa. Uma vez que na maioria dos casos os resíduos estão dispersos.



Combustíveis Sólidos	Caldeiras de pequena capacidade	Grelha fixa Grelha rotativa Queima em suspensão Leito fluidizado borbulhante
	Caldeiras de alta capacidade	Leito fluidizado circulante Queima tangencial Queima em suspensão Pressurizada Ciclônica
Combustíveis Líquidos e Gasosos	Queimadores dispostos frontalmente Queimadores dispostos lateralmente Queimadores dispostos na base da fornalha	

Emissões evitadas: muito dependentes dos casos específicos - linha de base (emissões dependem do tipo de resíduo agrícola) vs Aproveitamento Energético (contabiliza diesel para logística da biomassa e emissões evitadas do energético substituído)



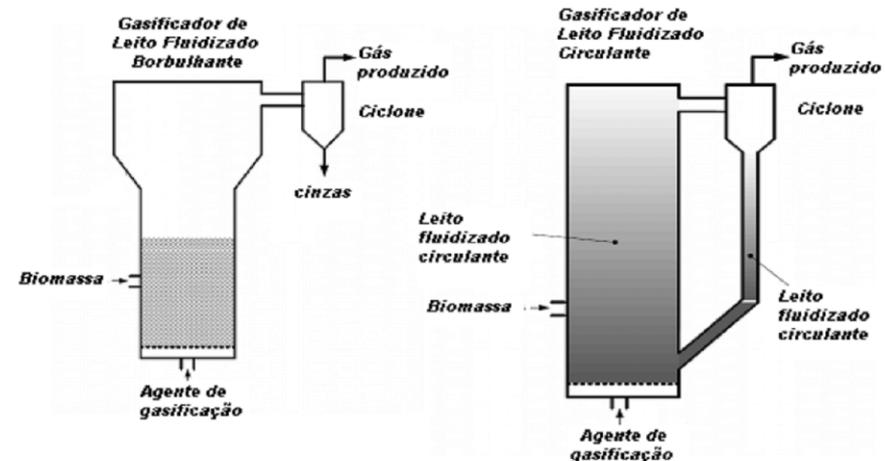
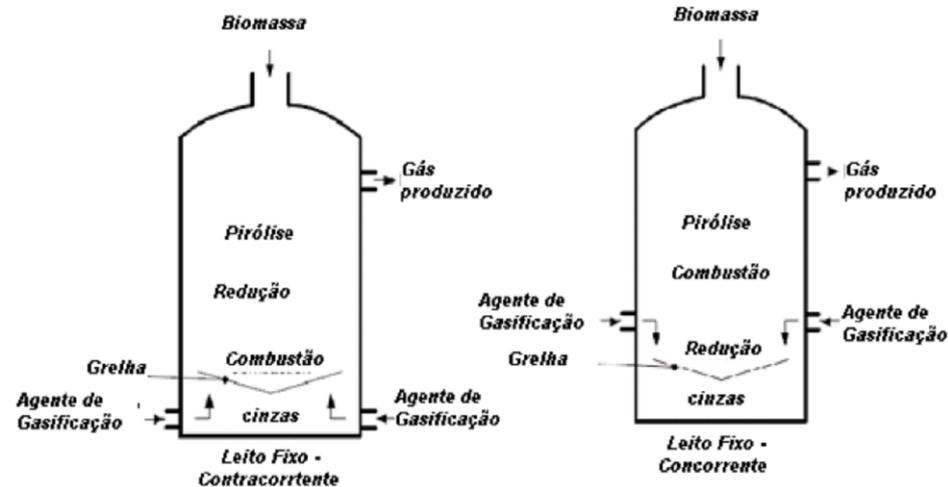
2. Medidas de Abatimento

2.3 Resíduos Agropecuários

■ Gasificação de resíduos agrícolas -

A gasificação, assim como a combustão, é um processo termoquímico com a diferença que ocorre em reatores com pouco oxigênio. O principal produto de saída é o gás de síntese, $\text{CO} + \text{H}_2$. A partir do gás de síntese é possível produzir desde biocombustíveis (avanzados) até biopolímeros

A gasificação tem tecnologias em diferentes estágios de desenvolvimento, variando de acordo com o substrato, tipo e escala do reator. E os custos ainda são muito altos.



Emissões evitadas: muito similar a biodigestão anaeróbica, com a diferença que o energético de saída pode ser diverso

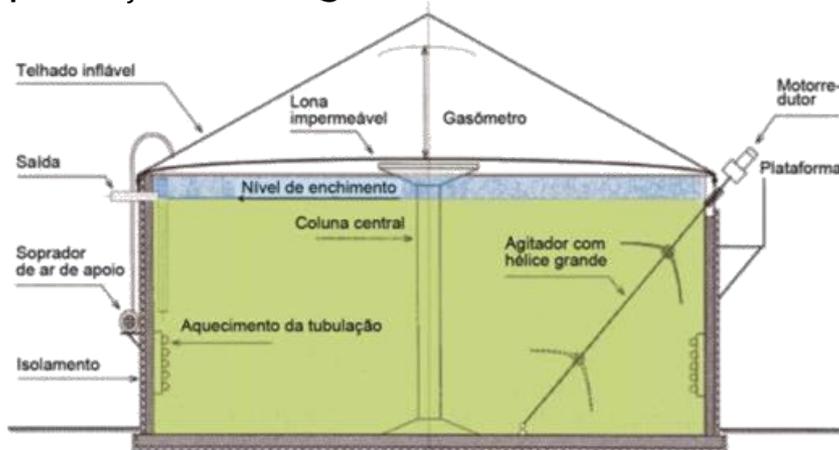
2. Medidas de Abatimento

2.3 Resíduos Agropecuários

- **Biodigestão de resíduos agropecuários** - biodigestão de resíduos da pecuária ou codigestão de resíduos da pecuária e agricultura.

Essa medida corresponde principalmente ao tratamento dos dejetos animais através do processo de biodigestão anaeróbica, com recuperação energética do biogás.

A codigestão, biodigestão de dois ou mais diferentes substratos, também é alternativa interessante quando há integração lavoura pecuária ou disponibilidade de resíduos agrícolas próximo. Esses últimos aumentam a produção de biogás.



Os esquemas tecnológicos são diversos, desde lagoas anaeróbicas cobertas (otimizadas ou não) até biodigestores CSTR. Emissões evitadas: depende das emissões de linha de base (tipo de resíduos e disposição final), da tecnologia de conversão reatores (reatores CSTR, lagoa coberta otimizada, etc) e uso do biogás

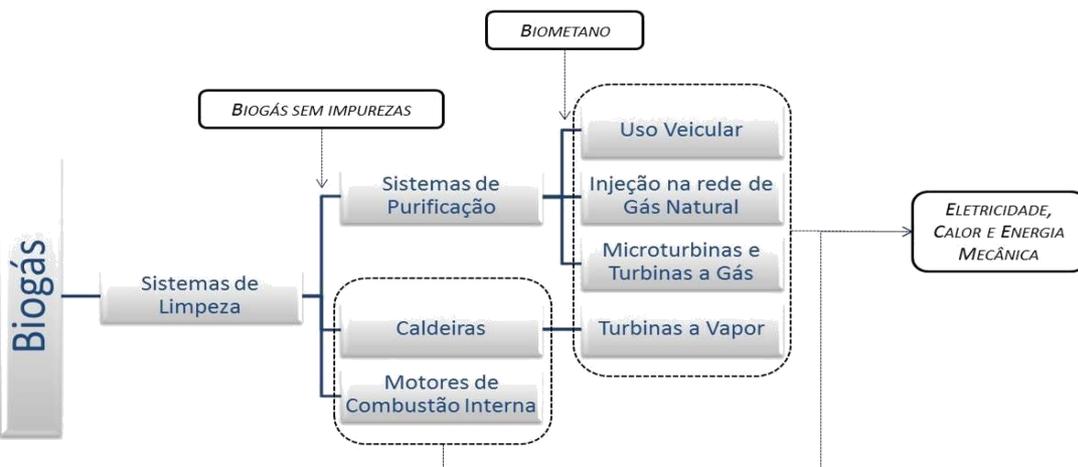
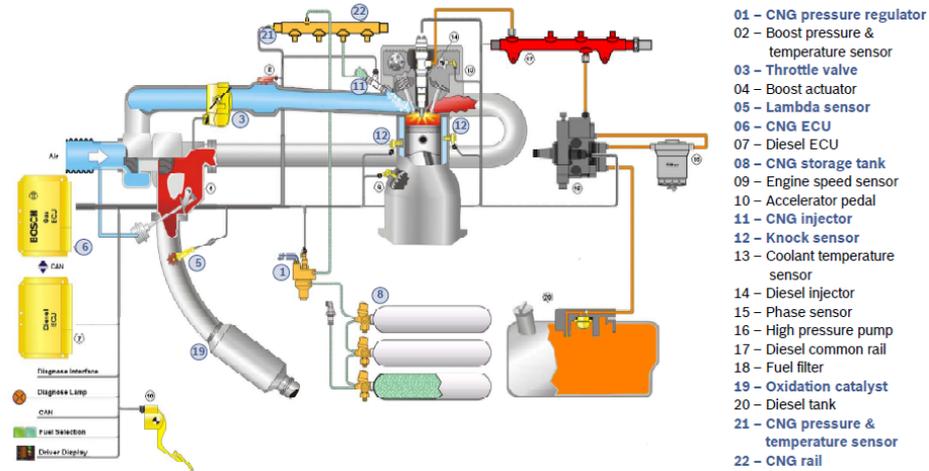
2. Medidas de Abatimento

2.4 Usos do Biogás

Dado que a produção de biogás é uma consequência de diversas medidas de abatimento no setor de gestão de resíduos, a definição do uso mais adequado do biogás é também fator relevante na mitigação de emissões.

Dado que o fator médio de emissão de GEE do grid elétrico brasileiro é baixo comparativamente a realidade internacional, medidas que substituam combustíveis fósseis são mais interessantes em termos de abatimento de emissões de GEE.

Diesel-Gas System Layout



As rotas mais difundidas para o uso do biogás são: a geração de eletricidade através de motores de combustão interna, a queima em caldeiras para produção de calor e a purificação para produção de biometano e uso como substituto do gás natural.



1. Referência e fontes de dados

- <<http://www.biochamm.com.br>>, acessado em 20/07/2014.
- <<http://www.epa.gov/solidwaste/nonhaz/municipal/hierarchy>>, acessado em 20/07/2014.
- ABRELPE. Energia Elétrica proveniente de Resíduos Sólidos Urbanos. ABRELPE. Rio de Janeiro. 2014.
- DE OLIVEIRA, LUIZ GUSTAVO SILVA. Aproveitamento Energético de Resíduos Agrícolas – O caso da Agroeletricidade Distribuída. URFJ/COPPE/PPE, Dissertação de Mestrado. 2011
- DEFRA, Department for Environment Food and Rural Affairs UK, 2013a. Incineration of Municipal Solid Waste. Disponível em www.defra.gov.uk.
- DEFRA, Department for Environment Food and Rural Affairs UK, 2013b. Advanced Biological Treatment of Municipal Solid Waste. Disponível em www.defra.gov.uk.
- EPA, Seção de Waste Management - <http://www.epa.gov/wastes/>
- EPA. Anaerobic Digestion Fact Sheets. Environmental Protection Agency, 2014. Disponível em: <<http://www.epa.gov/agstar/anaerobic/fact.html>>. Acesso em: 01 Agosto 2014.
- EPA. Summary for Current LMOP Landfill and LFG Energy Project database. Environmental Protection Agency. [S.l.]. 2012.
- EPE, 2014. Notas Técnicas de Aproveitamento Energético de Resíduos - http://www.epe.gov.br/mercado/Paginas/Estudos_27.aspx
- EPE, Seção de Wastewater management - <http://water.epa.gov/polwaste/wastewater/index.cfm>
- FNR. Guia Prático do Biogás. Ministério da Nutrição, Agricultura e Defesa do Consumidor da Alemanha (BMELV). [S.l.]. 2010. 5a edição. - http://www.resol.com.br/cartilhas/giz_-_guia_pratico_do_biogas_final.pdf
- IEA – AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, 2005, Biogas production and utilisation. IEA: Paris.
- IEA – AGÊNCIA INTERNACIONAL DE ENERGIA, 2013, Waste to Energy – Summary and Conclusions from the IEA Bioenergy ExCo71 Workshop. IEA, Vienna, Austria.
- IEA bioenergy - <http://www.ieabioenergy.com/>
- IEA bioenergy task - <http://www.ieabioenergy.com/our-work-tasks/>
- IPCC, Assessment Report 5 (Best Available Technologies) - <http://www.ipcc.ch/report/ar5/>
- ISWA, INTERNATIONAL SOLID WASTE ASSOCIATION, 2012. Waste-to-Energy state-of-the-art-report. 6ª edição. Copenhagen, Dinamarca.
- KAPLAN, P.; DECAROLIS & THORNLOE. 2009. Is it better to burn or bury waste for clean electricity generation? Environmental Science & Technology, 43 (n. 6): 1711-1717.
- KARANGIANNIDIS, A. e PERKOULIDIS, G. 2009. A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestions for energy recovery of the organic fraction of municipal solid wastes. Bioresource Technology, 100: 2355–2360.
- LANTZ, M.; SVESSON, M.; BJÖRNSSON L.; BJÖRNSSON, P. 2006. The prospects for an expansion of biogas systems in Sweden-Incentives, barriers and potentials, Energy Policy, 35: 1830–1843.
- LETTINGA, G. e HULSHOFF POL, L. M. 1991. UASB process design for various types of wastewaters. Water Science Tech., 24: 87-107.
- LETTINGA, G., VANVELSEN, A.F.M., HOMBA, S.W.; DEZEEUW, W., KLAPWIJK, A. 1980. Use of the upflow sludge blanket reactor concept for biological waste water treatment especially for anaerobic treatment. Biotechnology and Bioengineering, 22: 699-734.
- LETTINGA, G., VANVELSEN, A.F.M., HOMBA, S.W.; DEZEEUW, W., KLAPWIJK, A. 1980. Use of the upflow sludge blanket reactor concept for biological waste water treatment especially for anaerobic treatment. Biotechnology and Bioengineering, 22: 699-734.
- LI, YEBO, PARK, STEPHEN Y., ZHU, JIYING, 2011. Solid-state anaerobic digestion for methane production from organic waste. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15: 821-826.
- LOUREIRO, S. et al. Analysis of potential for reducing emissions of greenhouse gases in municipal solid waste in Brazil, in the state and city of Rio de Janeiro. Waste Management, 33, n. 5, Maio 2013. 1302-1312. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2013.01.024>.
- MOREIRA, H. 2013, Aproveitamento Energético de Biogás em ETEs – Status quo na Alemanha e no Brasil. Apresentação Powerpoint no 1º Congresso Técnico Brasil Alemanha de Gestão Sustentável de Resíduos Sólidos Urbanos. PROBIOGÁS/MCIDADES/GIZ: Jundiaí
- MORRIS, J., 1996. Recycling versus Incineration: an energy conservation analysis. Journal of Hazardous Materials, v. 47, p. 277-293.
- PEROVANO, T. G. e FORMIGONI, L. P. A. 2011. Geração de Energia a Partir de Subprodutos do Tratamento de Esgotos Sanitários. Monografia. UFES: Vitória.
- PERSSON, M., JÖNSSON, O., WELLINGER, A., 2006. Biogas upgrading to vehicle fuel standards and grid injection. IEA Bioenergy, Task 37 – Energy from Biogas and Landfill Gas. IEA: Paris.
- PETERSON, ANNELI;WELLINGER, ARTHUR, 2009. Biogas upgrading technologies – developments and innovations. IEA Biogas.
- RYCKEBOSCH, E; DROUILLON, M.; VERVAERN, H., 2011. Techniques for transformation of biogas to Biomethane. Biomass and Bioenergy, v. 35, p. 1633-1645.
- SUNG, S., 2008, Anaerobic Water Treatment Technologies. Material Didático. Iowa State University, 2008.
- WHITING, KEVIN, 2013. Review of the state-of art waste-to-energy technologies. Relatório Técnico WSP.



Processo Decisório e Cálculo do Custo de Abatimento



3. Processo Decisório e Cálculo do Custo de Abatimento

3.1 Metodologia do Custo de Abatimento

□ DEFINIÇÕES

- Curvas de Custos Marginais de Abatimento (MACC) - Curva que evidencia o custo para abater a emissão de uma unidade de gás de efeito estufa de um conjunto de medidas em relação a uma determinada Linha de Base
- Eixo y -> $\$/tCO_{2eq}$ Custo Marginal de Abatimento (Custo extra em relação a linha de base) (uso de CO_{2eq} pois há um conjunto de medidas de abatimento de diferentes gases de efeito estufa)
- Eixo x -> tCO_{2eq} - Potencial de Abatimento das determinadas medidas em relação a linha de base.
- Usos: Gerenciar portfólio de medidas, Comunicar e divulgar potenciais, organizar ações de mitigação, estratégia para obtenção de dados, acompanhamento de evolução dos potenciais



3. Processo Decisório e Cálculo do Custo de Abatimento

3.1 Metodologia do Custo de Abatimento

□ PARÂMETROS DE CONSTRUÇÃO DA MACC

- Definição de perspectiva de Análise : social, privada, setorial, etc - A principal variável é a taxa de desconto, que deve refletir os benefícios dada determinada ótica. Depende da finalidade da análise (entender diferença entre custo social e ótica privada, identificação de oportunidades de negócios, entender custos e relações de ações de incentivos a medidas de baixo carbono)
- Definição da escala de análise: projeto, empresa, setor, país, etc.
- Definição do período de análise e ano base: 2010 - 2050
- Definição de Linha de Base
- Levantamento de opções de mitigação disponível no horizonte de análise e parâmetros técnico-econômicos.
- Definir tipo de dinâmicas temporais: estática ou dinâmica
- Definir tipos de potencial: técnico, econômico ou de mercado

3. Processo Decisório e Cálculo do Custo de Abatimento

3.1 Metodologia do Custo de Abatimento

$$MAC = \frac{\sum P_{cc} + \sum PO\&Mc - \sum PR}{\sum AAE}$$

MAC - Custo Marginal de Abatimento (Marginal Abatement Cost)

P_{cc} - Custo de Capital Atualizado (Present Capital Cost)

PO&Mc - Custo de Operação e Manutenção Atualizado (Present O&M Cost)



3. Processo Decisório e Cálculo do Custo de Abatimento

3.2 Especificidades dos Custos de Abatimento no Setor de Gestão de Resíduos

➤ Definição da fronteira de análise

- Definição do escopo e fronteira de análise resultam em Potencial de Redução de emissões de GEE e custos diferentes

➤ Interação intersetorial

- A produção de resíduos é dada pela dinâmica e atividade de outros setores
- As medidas de mitigação de emissões de GEE podem evitar emissões em outros setores

➤ Composição dos custos (alocação de custos, definição de taxas de desconto)

- Como o benefício não é restrito ao setor, o investimento (e a lógica de decisão) não fica clara, pois a dinâmica do setor de gestão de resíduos é diferente da dinâmica do setor em que há a interação - taxas de desconto e

3. Processo Decisório e Cálculo do Custo de Abatimento

3.3 Exemplos de Medidas de Abatimento

i) Aproveitamento de biogás de ETE com UASB para geração de energia elétrica

Emissões Evitadas:

- Metano do tratamento de efluentes (setor de gestão de resíduos)
- Dióxido de carbono da eletricidade consumida (setor de energia)

Custos:

- Investimento em sistema de recuperação e tratamento de biogás
- Investimento em sistema de geração de energia elétrica
- O&M desses novos sistemas



3.3 Exemplos de Medidas de Abatimento

i) Aproveitamento de biogás de UASB para geração de energia elétrica

Toda alocação Setor de Resíduos	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Emissões Cenário Base (mil t CH ₄)	1.000,00	1.012,54	1.025,24	1.038,11	1.051,13	1.064,31	1.077,66	1.091,18	1.104,87	1.118,73	1.132,76
Recuperação de metano (mil t de CH ₄)	900,00	911,29	922,72	934,29	946,01	957,88	969,90	982,06	994,38	1.006,85	1.019,48
Energia elétrica gerada (MWh)	3.011,49	3.049,27	3.087,52	3.126,24	3.165,46	3.205,17	3.245,37	3.286,08	3.327,30	3.369,04	3.411,30
	0,40										
Emissões Evitadas											
CH ₄ do tratamento de efluentes (mil t)	900,00	911,29	922,72	934,29	946,01	957,88	969,90	982,06	994,38	1.006,85	1.019,48
CO ₂ da Eletricidade (t)	0,41	0,41	0,42	0,42	0,43	0,43	0,44	0,44	0,45	0,45	0,46
Total evitado de CO ₂ eq (milt)	22500,40655	22782,645	23068,424	23357,787	23650,78	23947,448	24247,838	24551,996	24859,968	25171,804	25487,552
Custos											
Sistema de Recuperação de biogás	202.222,06										
Sistema de Geração de Energia	606.666,18										
O&M	40.444,41	40.444,41	40.444,41	40.444,41	40.444,41	40.444,41	40.444,41	40.444,41	40.444,41	40.444,41	40.444,41
Custo Total Atualizado	849.332,65	40.444,41	40.444,41	40.444,41	40.444,41	40.444,41	40.444,41	40.444,41	40.444,41	40.444,41	40.444,41
Receitas											
Economia com Energia Elétrica	-752,87	-762,32	-771,88	-781,56	-791,36	-801,29	-811,34	-821,52	-831,82	-842,26	-852,82
Custo Líquido Total (mil R\$)	848579,7743	39682,095	39672,533	39662,851	39653,047	39643,12	39633,069	39622,892	39612,587	39602,153	39591,588
taxa de retorno	10%										
Custo líquido Total Atualizado	R\$ 992.893,99										
Emissões evitadas totais (milt de CO ₂ eq)	263.627										
Custo Marginal de Abatimento (R\$/t de CO₂eq)	3,77										



3.3 Exemplos de Medidas de Abatimento

ii) Uso do biometano (planta de biodigestão anaeróbica) combustível na frota de coleta

Emissões mitigadas:

- metano emitido por aterros (setor de gestão de resíduos)
- dióxido de carbono emitido pela queima do diesel (setor de transportes)

Custos:

- Investimento em planta de biodigestão de RSU e upgrade de biogás biogás (setor de gestão de resíduos)
- Adaptação ou compra de caminhões (setor de gestão de resíduos)



3.3 Exemplos de Medidas de Abatimento

ii) Uso do biometano (biodigestão anaeróbica) combustível na frota de coleta

	2010	2012	2014	2016	2018	2020
Emissões Cenário Base (mil t de CH ₄)	1000	1045,91529	1093,938794	1144,167311	1196,702085	1251,649008
Recuperação de biogás de aterro (mil t de CH ₄)	989	989	989	989	989	989
Consumo específico caminhão (mil l de diesel)	46					
Capacidade planta de biodigestão (mil t de CH ₄)	1,0					
Número de plantas	1000					
Número de Caminhões atendidos	29307					
Emissões Evitadas						
CH ₄ de aterro	989	989	989	989	989	989
CO ₂ da Frota	3381	3381	3381	3381	3381	3381
Total evitado de CO ₂ eq	28097	28097	28097	28097	28097	28097
Custos						
Planta de biodigestão e upgrade (mil R\$)	R\$ 45.000.000,00					
Investimento na Frota (mil R\$)	R\$ 2.930.700,00					
O&M	R\$ 4.500.000,00					
Custo Total	R\$ 52.430.700,00	R\$ 4.500.000,00				
Receitas						
Economia com Diesel (mil R\$)	-R\$ 3.370.305,00					
Receita Total	-R\$ 3.370.305,00					
Custo Líquido Total	R\$ 49.060.395,00	R\$ 1.129.695,00				
taxa de retorno	10%					
Custo líquido Total Atualizado (mil R\$)	R\$ 50.910.801,58					
Emissões evitadas totais (mil t de CO ₂ eq)	309.072					
Custo Marginal de Abatimento (R\$/tCO ₂ eq)	164,72					



3.3 Exemplos de Medidas de Abatimento

iii) Geração de eletricidade a partir de biogás de dejetos suínos

Emissões evitadas:

- Emissões de metano de resíduos da pecuária (Setor Pecuário Pecuário)
- Emissões equivalentes de dióxido de carbono da eletricidade (diferentes setores)

Custos:

- Investimento na unidade de biodigestão
- Investimento na unidade de geração de eletricidade e conexão
- Investimento na logística da biomassa agrícola.



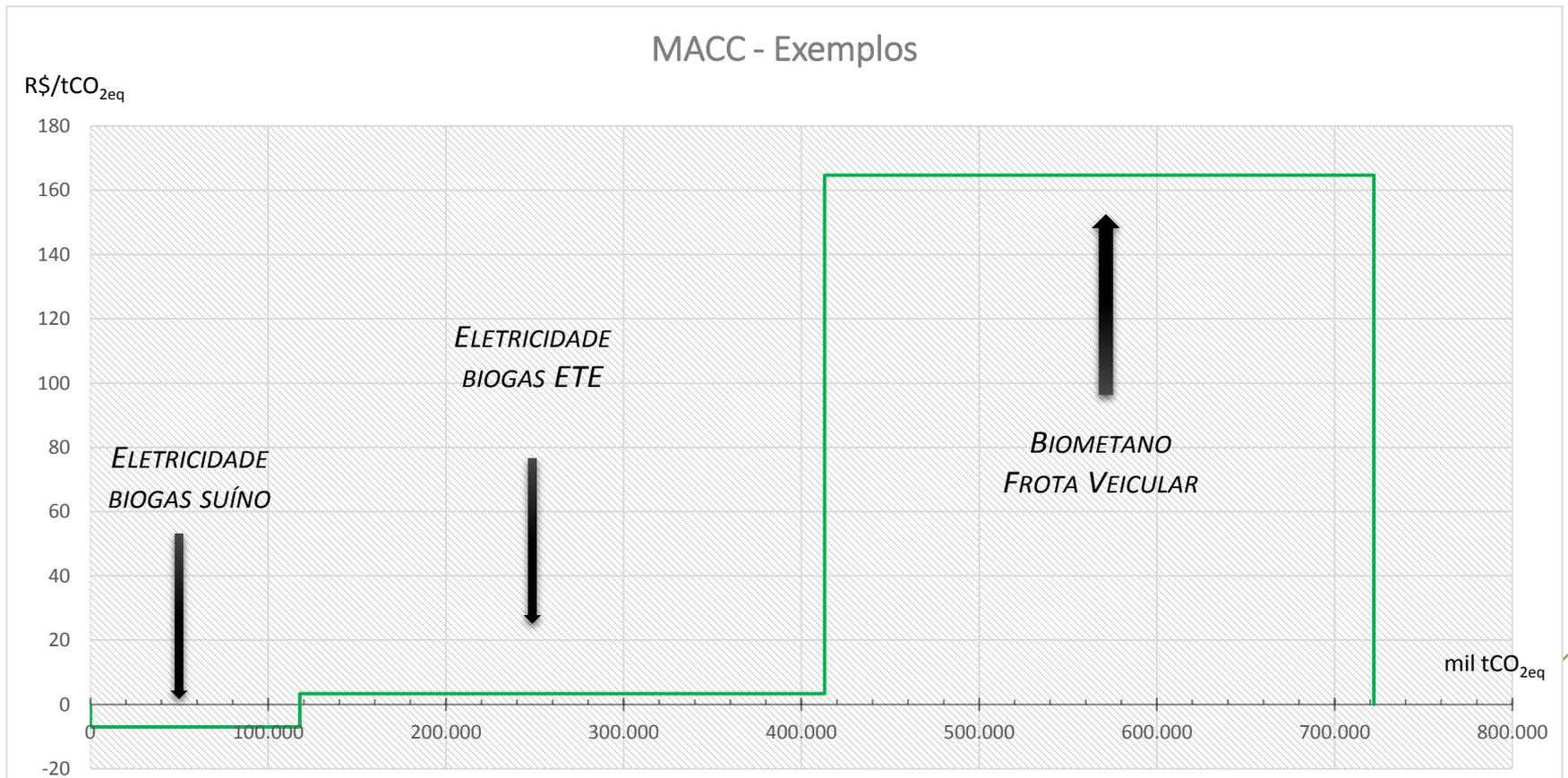
3.3 Exemplos de Medidas de Abatimento

iii) Geração de eletricidade a partir de biogás de dejetos suínos

	2010	2012	2014	2016	2018	2020
Emissões Cenário Base (mil t CH ₄)	375	398	422	448	475	504
Capacidade planta biogás	1					
Consumo biometano (mil m ³)	2389,091					
Consumo biometano (mil t)	1,5768					
Nº de plantas	237					
Emissões Evitadas						
CH ₄ de aterro (milt)	374	374	374	374	374	374
CO ₂ eletricidade (milt)	252	252	252	252	252	252
Total evitado de CO ₂ eq	10716	10716	10716	10716	10716	10716
Custos						
Planta de biodigestão (mil R\$)	R\$ 805.800,00					
O&M	R\$ 40.290,00					
Custo Total	R\$ 846.090,00	R\$ 40.290,00				
Receitas						
Venda eletricidade	-R\$ 280.276,20					
Receita Total	-R\$ 280.276,20					
Custo Líquido Total	R\$ 565.813,80	-R\$ 239.986,20				
taxa de retorno	10%					
Custo líquido Total Atualizado (mil R\$)	-R\$ 826.179,55					
Emissões evitadas totais (mit t CO ₂ eq)	117875					
Custo Marginal de Abatimento (R\$/t CO₂eq)	-7,01					

3.3 Exemplos de Medidas de Abatimento

Curva de custo marginal de abatimento das medidas descritas





3. Processo Decisório e Cálculo do Custo de Abatimento - Referências e fontes de dados

- Banco Mundial, 2010. Estudo de Baixo Carbono para o Brasil - http://www.esmap.org/sites/esmap.org/files/Relatorio_Principal_integra_Portugues.pdf
- Beckel, L, et al Using Marginal Abatement Cost Curves to Realize the Economic Appraisal of Climate Smart Agriculture Policy Options - http://www.fao.org/docs/up/easypol/906/ex-act_macc_116en.pdf
- IPCC, 2007. Fourth Assessment Report. <http://www.ipcc.ch/report/ar4/>
- IPCC, 2013. Fifth Assessment Report. <http://www.ipcc.ch/report/ar5/>



*OBRIGADO
LUIZ GUSTAVO S. DE OLIVEIRA
lugu.siloli@gmail.com*