



## POTENCIAL DE USINAS WASTE TO ENERGY NO NORDESTE BRASILEIRO: PROJEÇÃO E ANÁLISE COMPARATIVA DE IMPACTOS NA ESFERA AMBIENTAL E NO SETOR ENERGÉTICO

## POTENTIAL OF WTE PLANTS IN BRAZIL'S NORTHEASTERN: FORECAST AND COMPARATIVE ANALYSIS OF ENVIRONMENTAL AND ENERGY SECTOR IMPACTS

Luiz Neto Paiva e Silva Muller\* E-mail: [luizpsmuller@gmail.com](mailto:luizpsmuller@gmail.com)

João Bosco Furtado Arruda\*\* E-mail: [barruda@glen.ufc.br](mailto:barruda@glen.ufc.br)

João José Hiluy Filho\*\* E-mail: [jjhiluy@gmail.com](mailto:jjhiluy@gmail.com)

\*Universidade Federal de São Carlos (UFSCAR), São Carlos, SP

\*\*Universidade Federal do Ceará (UFC), Fortaleza, CE

**Resumo:** A gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) e a oferta de eletricidade são preocupações presentes no Brasil. Nesta conjuntura, as usinas de geração de energia a partir de resíduos sólidos (*Waste To Energy* -WTE) surgem como alternativa de investimento que poderia trazer benefícios tanto para a gestão dos RSU, pela mitigação de impactos ambientais, quanto para o setor elétrico brasileiro. Este trabalho tem o objetivo de analisar de forma comparativa cenários futuros na gestão de RSU no Nordeste levando em conta investimentos em usinas WTE. Para isto, foram projetados por meio de método quantitativo de modelagem - em um período de 20 anos - os impactos sobre a ocupação de espaço para gestão dos RSU, as emissões dos gases metano e carbônico, e a geração de energia na região. Os resultados destacam o potencial benéfico das usinas WTE, através do aumento considerável na geração de energia e da diminuição notável das emissões de gases de efeito estufa (GEE) e da ocupação de espaço.

**Palavras-chave:** Resíduos sólidos urbanos. Usinas WTE. Nordeste Brasileiro. Benefícios.

**Abstract:** The Municipal Solid Waste (MSW) management and electricity supply are concerns present in Brazil. At this juncture, the waste to energy plants (WTE) emerge as an alternative investment that could bring benefits to both the management of MSW, for the mitigation of environmental impacts, as for the Brazilian electricity sector. This work has the objective of analyzing in a comparative way future scenarios in Northeast's MSW management considering investments in WTE plants. For this purpose, the impacts on the occupation of space for MSW management, the emissions of methane and carbonic gases, and the generation of energy in the region were projected through a quantitative method of modeling over a period of 20 years. The results highlight the potential benefits of WTE plants through the considerable increase in power generation and notable reduction on greenhouse gases (GHG) emissions and on the space occupancy.

**Keywords:** Municipal solid waste. WTE plants. Brazilian Northeast. Benefits.

## 1 INTRODUÇÃO

A gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) é uma preocupação tanto mundial quanto no Brasil. Estudos (ABRELPE, 2012; 2013; 2014; 2015; 2016)

apontam que, nos anos de 2011 até 2015, o país teve aumento na taxa anual de geração de RSU maior do que a taxa de crescimento populacional. Além disso, dados mostram que, em 2015, 41,3% dos RSU coletados foram dispostos em lixões ou aterros controlados (ABRELPE, 2016). Em resumo, a geração per capita de RSU vem aumentando e quase metade dos RSU coletados no Brasil ainda são tratados através de sistemas que não possuem o conjunto de dispositivos necessários para a proteção do meio ambiente e da saúde pública.

Paralelamente, o Brasil apresenta problemas no setor de oferta de eletricidade. Em 2014, a crise energética atingiu algumas regiões do país, especialmente o Sudeste. Esse fato é recorrente e tem a crise hídrica como principal causadora. O país é altamente dependente das hidrelétricas (responsável por 65% da matriz de oferta) para geração de eletricidade, o que aumenta o risco de crise no setor (BRASIL, 2015a). Outro fato que potencializa este problema é o investimento insuficiente no setor. Uma análise dos gastos brasileiros em infraestruturas logísticas destaca que o percentual investido no setor de eletricidade entre 2006 e 2014 foi abaixo do valor considerado ideal para países em desenvolvimento (ARRUDA, 2014).

Nesta conjuntura, as usinas de geração de energia a partir de resíduos sólidos (*Waste To Energy* - WTE) surgem como alternativa de investimento que poderia trazer benefícios tanto para a gestão dos RSU quanto para o setor elétrico brasileiro (OLIVEIRA E ROSA, 2003). As tecnologias térmicas de geração de energia através de resíduos sólidos usam métodos térmicos que recuperam a energia armazenada nos resíduos, ajudam na redução das emissões de gases de efeito estufa (GEE), diminuem o volume dos resíduos e, conseqüentemente, reduzem a utilização de espaço para disposição final (THEMELIS ET AL., 2013; RENTIZELAS ET AL., 2014). Estima-se que somente na Europa as usinas WTE tratem cerca de 81 milhões de toneladas de resíduos sólidos por ano, gerando aproximadamente 32.000 GWh de energia elétrica e evitando, em média, a emissão de 30 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> (CEWEP, 2013).

O presente trabalho foca na região Nordeste do Brasil. Entre as cinco regiões do país, o Nordeste é a segunda maior geradora de RSU, sendo responsável por cerca de 1/4 (55.862 t/dia) do total nacional produzido; destes, 78,5% são coletados e um pouco mais de 2/3 dos resíduos coletados no Nordeste são dispostos em

aterros controlados ou lixões, percentual 22% maior do que a média atual nacional (ABRELPE, 2016). Nesse cenário, cabe-se destacar que o Nordeste brasileiro apresenta uma produção energética de saldo positivo que poderia ser incrementada com a criação de usinas de geração de energia através de resíduos sólidos (WTE) e, assim, ajudar outras regiões brasileiras fornecendo seu saldo energético positivo.

Diante disso, esta pesquisa tem o objetivo de analisar de forma comparativa cenários futuros na gestão de RSU no Nordeste levando em conta investimentos em usinas WTE. Para isso, são projetados, e analisados possíveis benefícios decorrentes da gestão dos resíduos sólidos urbanos com impacto para o setor de eletricidade, implicando na diminuição da quantidade de RSU a serem dispostos em aterros e lixões, bem como no decréscimo de ocupação de espaço, na redução dos índices de emissão de gases metano e carbônico, além do provável aumento de geração de energia da região. Deve-se ressaltar que a análise contempla um período de 20 anos (2017 até 2036) e aborda somente a tecnologia térmica de incineração em um cenário em que todo RSU coletado da região é tratado em usinas WTE e também em um segundo cenário no qual somente os RSU orgânicos coletados são tratados nestas usinas.

O trabalho adota a seguinte estrutura: na parte 2 discute-se o estado da arte das tecnologias térmicas WTE para tratamento de RSU com ênfase na incineração; a parte 3 apresenta a metodologia do estudo; na parte 4 discorre-se sobre atual problemática dos RSU no Nordeste e, além disso, apresenta-se os balanços energéticos nacional e regional; a parte 5 projeta e analisa cenários com e sem a instalação de usinas WTE no Nordeste; a parte 6 discute-se os resultados, comparando os impactos do cenário sem intervenção e dos cenários com a instalação de usinas WTE. Por fim, explicitam-se as conclusões e considerações finais.

## **2 TECNOLOGIAS WTE DE TRATAMENTO TÉRMICO**

Segundo vários autores da área - como Themelis *et al.* (2013) e Rentizelas *et al.* (2014) - os sistemas térmicos de tratamento de RSU com geração de energia são tecnologias, dentre outras, chamadas de *Waste to Energy* (WTE), que usam métodos térmicos e geram benefícios de recuperação da energia armazenada nos

resíduos, redução das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), diminuição do volume dos resíduos e, conseqüentemente, redução da utilização de espaço para sua disposição final.

Os gases resultantes da queima controlada e devidamente preparada dos RSU passam por filtros que visam diminuir seus níveis contaminantes; já as escórias em algumas tecnologias podem ser utilizadas como matéria-prima para produtos da construção civil. A energia elétrica é produzida principalmente através do calor originado da queima de resíduos cujos gases ativam uma turbina. Segundo Ciceri (2014), os custos, a eficiência energética, a redução das emissões de GEE e a redução de volume e massa dos RSU variam bastante com a tecnologia utilizada e o planejamento do seu processo.

Atualmente as tecnologias térmicas em destaque são a pirólise, a gaseificação, o arco de plasma e a incineração.

## **2.1 Pirólise**

A *pirólise* é conhecida pelo seu processo de decomposição térmica na ausência de oxigênio, o que gera produtos recicláveis com potencial de geração de energia como gás, óleo e carvão (CHEN *et al*, 2014). A FEAM (2010) aponta a cidade de Günzburg na Alemanha como uma das primeiras a utilizar uma usina de pirólise para processar seus resíduos urbanos; entretanto, existem poucas usinas com esta tecnologia e, por isso, não há muitas informações sobre suas características e seus impactos.

## **2.2 Gaseificação**

Outra tecnologia térmica empregada é a *gaseificação*. Esta opção atinge temperaturas maiores do que a incineração, reduzindo ainda mais os índices de contaminantes como o CO<sub>2</sub> e resultando em eficiência de até 30% na conversão de energia. Por outro lado, as unidades de gaseificação são mais complexas do que os incineradores, ocasionando a necessidade de mão de obra mais capacitada e custos mais elevados. Esta dificuldade ocorre essencialmente por causa do processo de resfriamento e limpeza do gás resultante, chamado de gás de síntese (YAP e NIXON, 2015).

### 2.3 Arco de plasma

O tratamento térmico por arco de plasma é mais recente e trabalha com maiores temperaturas em comparação com as outras tecnologias, produzindo um gás mais “limpo”; as grandes temperaturas geradas pela tocha de plasma, acima de 10.000°C, causam a dissociação das ligações moleculares em compostos mais simples. No entanto, um estudo de avaliação de tecnologias emergentes, realizado por Ciceri (2014), conclui que, apesar do tratamento por arco de plasma mostrar alguns indícios de vantagens - como a existência de dados de amostras, certificadas em escala de demonstração, apontando índices de emissão de contaminantes e dioxinas menores que outros métodos e dentro das normas da Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA), sua aplicação ainda é relativamente de pequena escala para os resíduos sólidos urbanos (RSU) e seu investimento é alto comparado a outras opções. Assim sendo, a utilização desta tecnologia em uma usina WTE de tratamento de RSU de uma região tem maior risco em relação às outras alternativas mais usadas.

### 2.4 Incineração

Dentre elas, a *incineração* é a mais antiga, há mais informações disponibilizadas da sua utilização no tratamento de RSU e evoluiu consideravelmente no seu processo de tratamento de contaminantes. Na atualidade, esta alternativa térmica possui o maior índice de uso; dados apontam que cerca de 70% dos RSU do Japão são incinerados para geração de energia (FEAM, 2010; MASSARUTTO, 2015). Na Figura 1, observa-se que a Europa, o Japão e os EUA destacam-se como os locais que mais concentram usinas WTE de tecnologia térmica, sendo, na sua grande maioria, incineradores.

**Figura 1-** Localização de usinas WTE de tecnologia térmica no mundo



Fonte: Waste Atlas (2015)

A geração de energia é bastante destacada por diversos estudos que abordam a problemática dos RSU no Mundo. A *Confederation of European Waste to Energy Plants* (CEWEP, 2013) estima que as usinas WTE da Europa geraram, somente em 2012, 32.000 GWh de eletricidade (correspondente a, aproximadamente, 7% da energia consumida no Brasil em 2014). Segundo Lombardi *et al.* (2015) e Yap e Nixon (2015), a eficiência na geração de energia das usinas de incineração pode variar entre 18 e 31% dependendo do seu tamanho, do nível de umidade e do poder calorífico dos resíduos; usinas grandes com elevadas taxas de processamento possuem maior percentual de geração de energia; por outro lado, RSU com alta umidade e baixo poder calorífico prejudicam o seu processo de recuperação de energia.

Em relação às características de redução de volume e massa dos RSU, já foi reportado que os incineradores podem reduzir entre 80% e 90% da área necessária ao descarte de resíduos, sendo essa redução um fator essencial na mitigação do impacto ambiental devido aos RSU.

Em recente estudo, Yap e Nixon (2015) comparam a quantidade de área que diversos tipos de tratamento de RSU necessitam para o seu funcionamento; os autores mostram que a área ocupada por uma usina de incineração que processa 300 toneladas de resíduos por dia (0,8 hectares) chega a ser 45 vezes menor que a área necessária para a disposição destes resíduos em aterros sanitários.

Vimos também que as emissões de GEE dos RSU podem ser mitigadas através do processamento em usinas WTE. A CEWEP (2013) aponta que as usinas situadas na Europa evitaram a emissão de, em média, 30 milhões de toneladas de CO<sub>2</sub> em 2012. Johnke (2002) afirma que o CO<sub>2</sub> é a principal GEE emitido pelos

incineradores de RSU sendo, em média, gerados 0,415 mg de CO<sub>2</sub> danoso ao meio ambiente a cada 1,0 mg de resíduo processado, o que nos permite calcular as emissões deste gás quando do uso desta tecnologia. Já o CH<sub>4</sub> não é gerado durante as operações normais da incineração.

### **3 METODOLOGIA**

O presente trabalho utiliza-se do método quantitativo de modelagem para analisar o contexto do setor energético e da esfera ambiental. Segundo Morabito e Pureza (2012), os modelos quantitativos utilizam linguagem matemática para calcular características de um determinado sistema, podendo ser usado para auxiliar na análise de resultados de diferentes cenários possíveis no sistema. Com o intuito de analisar o potencial das usinas WTE e comparar diferentes cenários, lançou-se mão de fórmulas/modelos matemáticos para estimar resultados da área ocupada para disposição final de resíduos, da emissão de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> e da energia elétrica gerada em três diferentes cenários de gestão de RSU no Nordeste, sendo ao final, comparados os valores calculados em cada cenário.

Os cenários avaliados são: Cenário sem intervenção (Prognóstico), Cenário 01 com usinas WTE e Cenário 02 com usinas WTE. No cenário 01 com usinas WTE, considera-se que 100% dos RSU coletados no Nordeste nos próximos 20 anos serão tratados em incineradores com processamento de 300 toneladas por dia cada, totalizando, em 2036, 288 usinas na região. Já no cenário 02 com usinas WTE, somente o RSU orgânico (51,4% de acordo com a PNRS) será tratado em 147 incineradores, e o RSU restante continuará destinado a aterros/lixões.

Dados secundários foram obtidos através de pesquisa bibliográfica de estudos realizados por órgãos e institutos como MME, USEPA, ABRELPE, e trabalhos acadêmicos (dissertações, teses e artigos científicos). Esses dados serviram para analisar a atual problemática dos RSU no Nordeste, levantar os balanços energéticos nacional e da região, e calcular os impactos dos cenários através das fórmulas.

#### **3.1 Contexto do setor energético**

Primeiramente, para dar suporte aos benefícios de geração de energia em usinas WTE, são analisadas algumas das principais características do setor energético do Brasil e do Nordeste, sendo considerados dados e informações sobre a oferta e demanda, a matriz de geração e os investimentos no setor de energia elétrica. Nesse momento os seguintes estudos serviram de base: “Balanço Energético Nacional 2015”, “Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015”, “Estudos prospectivos sobre o desenvolvimento do Nordeste- Tema IV - Infraestrutura Econômica e Logística” e um grupo de cinco trabalhos de “Estudos para a licitação da expansão da transmissão” de energia do Ministério de Minas e Energia (MME).

Em seguida, projeta-se a quantidade de energia elétrica gerada por usinas WTE de incineração de resíduos sólido urbanos em diferentes cenários de gestão de RSU no Nordeste. Para o cálculo utilizou-se as equações 1 e 2 (SILVA, 2015).

$$P_{inc} = \eta_v \times \eta_g \times M_i(t) \times PCI \quad (1)$$

$$E = P_{inc} \times (H/\text{ano}) \times CP \quad (2)$$

Segundo Silva (2015), a *potência elétrica* -  $P_{inc}$  (em MW) é calculada a partir dos valores da *eficiência do ciclo a vapor* ( $\eta_v$ ), da *eficiência do gerador elétrico* ( $\eta_g$ ), da *taxa de incineração* de RSU [ $M_i(t)$  em kg/s] e do poder calorífico inferior do RSU da entrada da caldeira ( $PCI$  em MJ/kg). Já a energia elétrica ( $E$ ) é estimada multiplicando-se a potência elétrica ( $P_{inc}$ ) pela quantidade de horas operadas no ano ( $H/\text{ano}$ ), levando em consideração o percentual de tempo em um ano em que o equipamento está produzindo eletricidade em capacidade plena ( $CP$ ).

### 3.2 Contexto da esfera ambiental

Como já mencionado, foram estimados os resultados ambientais de área ocupada para disposição final de resíduos e de emissão de  $CH_4$  e  $CO_2$  em três diferentes cenários.

Os resultados referentes a área, são calculados pela técnica apresentada por Younes *et al.* (2015). Segundo este autor, o espaço ocupado pelos RSU dispostos em aterro/lixões pode ser estimado através da equação (3):

$$\text{Área} = R \times L \times \text{Pop} \times 1,5 / (\rho_{bulk} \times H) \quad (3)$$

onde R é taxa de geração *per capita* por ano de RSU (kg/hab/ano); L é o tempo de utilização do aterro/lixão (em anos); Pop é quantidade total de pessoas na população considerada;  $\rho_{bulk}$  é a densidade dos resíduos (kg/m<sup>3</sup>); e H é a altura dos amontoados de resíduos no aterro (m).

Em relação a quantidade de gás metano (CH<sub>4</sub>) e gás carbônico (CO<sub>2</sub>) emitidos pelos RSU destinados a aterros ou lixões, utilizou-se a ferramenta *Landgem*. De acordo Cho *et al.* (2012) e Karanjekar *et al.* (2015) a ferramenta *Landgem* - criada pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) - é comumente usada em estudos de previsão de produção de gases a partir de RSU. Para seu cálculo, é necessário inserir na planilha do *Landgem* os valores de *i*, *n*, K, L<sub>o</sub>, NMOC, volume de metano e M<sub>i</sub>. Onde *i* é o ano de início e *n* o ano de término do funcionamento do aterro; K é a taxa de geração de metano; L<sub>o</sub> é a capacidade potencial de geração de metano; a concentração de compostos orgânicos voláteis não-metânicos (NMOC em ppmv hexano); volume de metano (em %) e M<sub>i</sub> a quantidade de RSU que entra no aterro ou lixão todo ano.

## 4 SITUAÇÃO ATUAL DA GESTÃO DE RSU E DO SETOR ENERGÉTICO

### 4.1 Gestão dos RSU no Nordeste brasileiro

O Nordeste brasileiro é composto por 1.794 municípios distribuídos por nove estados em uma área total de 1.561.177,8 km<sup>2</sup> (maior que a soma das áreas dos países da Alemanha, França, Itália e Reino Unido). Em conjunto, esses municípios possuem cerca de 56,2 milhões de habitantes, número quase igual a população da Espanha e Portugal juntas (WORLD BANK, 2014), que geram diariamente cerca de 56 mil toneladas de RSU, quantidade que representa 25,6% do RSU em todo Brasil (ABRELPE, 2016). A Figura 2 mostra um esquema com os volumes e destinação dos RSU no Nordeste brasileiro.

**Figura 2** - Volumes gerados, coletados e destinação dos RSU no Nordeste brasileiro



**Fonte:** Elaborado pelos autores, a partir de dados da ABRELPE (2016)

Das 55.862 toneladas diárias de RSU geradas na região, quase 79 % são coletados e dispostos em aterros ou lixões. Estes dados apresentam um cenário preocupante, no qual mais de 20% dos RSU produzidos na região não são coletados e quase 2/3 dos RSU coletados (RSU dispostos em aterro controlado ou lixão) não passam por um mínimo de boas práticas para mitigar os impactos negativos à saúde da população e ao meio ambiente.

Segundo a Política Nacional de Resíduos Sólidos - PNRS os aterros controlados e lixões são ilegais e devem ser extintos (BRASIL, 2010); ademais, Wenjing *et al.* (2015) afirmam que os aterros, assim como os lixões, são fontes de odores poluentes que prejudicam a qualidade de vida do ambiente em seu entorno, podendo provocar sintomas nocivos ao ser humano relacionados aos sistemas cardíaco, cognitivo, neuromuscular e gastrointestinal, entre outros. Outro problema é a emissão de gases de efeito estufa (GEE) que são produzidos pela decomposição dos resíduos biodegradáveis. De acordo com Turner *et al.* (2011), as emissões de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) e gás metano (CH<sub>4</sub>) são responsáveis por 90% do total de GEE gerados pelos resíduos.

Vários autores também citam a grande ocupação de espaço como uma desvantagem da disposição de RSU em lixões e aterros, já que estes não propiciam uma redução significativa de volume e massa dos resíduos e rejeitos (BRUNNER e RECHBERGER, 2015; YAP e NIXON, 2015). Este fato é bastante visível ao comparar com os índices de redução de volume e massa dos RSU nos tratamentos térmicos que podem variar entre 80-90% e 70-80% respectivamente (LOMBARDI ET AL.,2015).

## 4.2 Balanço energético do Brasil e do Nordeste

Ao analisar o histórico brasileiro, ficam evidentes várias situações adversas no setor de energia elétrica deletérias ao desenvolvimento regional. Em 2001 as notícias abordando a crise energética eram recorrentes (JORNAL DA UNICAMP, 2001) e desde então houveram várias medidas e fatos (racionamentos e apagões) que ratificaram a situação de crise vivida até os dias de hoje.

Bhattacharya *et. al.* (2012) estimam que, no caso dos países em desenvolvimento, sejam necessários investimentos anuais, nos setores de infraestruturas, entre 1,8 e 2,3 trilhões de dólares (preço de 2008); além disso, esses autores sugerem que o setor de eletricidade deve receber entre 45 a 60% daqueles investimentos. Entretanto, ao analisar o Brasil, Arruda (2014) mostra que os gastos do país no setor de eletricidade (39%) não atendem àquele requisito, o que sugere a necessidade de análise do atual cenário energético do Brasil com foco na geração e consumo de energia elétrica.

No tocante ao equilíbrio entre geração e consumo de energia elétrica, pelo menos até 2014, o Brasil possuía saldo positivo, isto é, a quantidade de eletricidade ofertada no país tem sido maior do que o total demandado pela população (ver Gráfico 1).

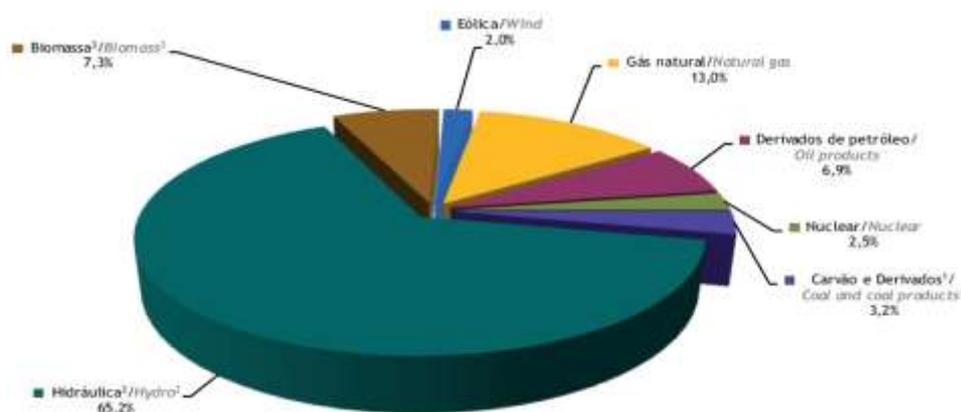
Ao observar a evolução da demanda e oferta de eletricidade entre 2010 e 2014, é possível evidenciar um crescimento recorrente de ambas, sendo a oferta de energia elétrica sempre superior à demanda nacional. Apesar de ser autossuficiente na produção de energia elétrica, o país é altamente dependente das hidrelétricas. Dados do Ministério de Minas e Energia (BRASIL, 2015a) apontam uma matriz elétrica desbalanceada, onde quase 2/3 da eletricidade do país é gerada por usinas hidrelétricas (ver Gráfico 2).

**Gráfico 1 - Balanço elétrico do Brasil**



**Fonte:** Elaborado pelos autores, a partir de Dados MME (BRASIL, 2015b)

**Gráfico 2 - Oferta interna de energia elétrica por fonte.**



**Fonte:** BRASIL (2015a)

A grande dependência da fonte hidráulica gera elevado risco de falta de eletricidade em períodos em que haja significativa diminuição dos níveis de pluviosidade no país, como aconteceu em 2015. Esse cenário negativo é recorrente nos últimos anos no Brasil, principalmente na região Sudeste, onde a demanda de energia elétrica é maior em comparação com as demais regiões brasileiras, correspondendo a mais da metade do consumo total do país (51,1%). O Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015 do MME (BRASIL, 2015b) destaca que a região Sudeste não é autossuficiente na produção de energia elétrica; em 2014 esta região gerou 181.201 GWH, enquanto seu consumo alcançou o valor de 243.123 GWH; ou seja, em 2014, o Sudeste teve um déficit de 61.922 GWH o qual foi suprido por eletricidade produzida em outras regiões do país, como o Nordeste.

Diferentemente do Sudeste, o Nordeste apresenta saldo positivo no seu balanço de energia elétrica. No ano de 2014, o Nordeste gerou 96.449 GWH e consumiu somente 80.746 GWH, resultando em uma sobra de 15.703 GWH. Um dos principais motivos deste saldo positivo neste período é a sua recente evolução na geração de energia a partir de aero-geradores, representando um acréscimo de 20,8% em relação a 2013 (maior taxa de crescimento entre as regiões brasileiras).

Este cenário destaca o potencial que o Nordeste possui em fornecer energia elétrica excedente para o Sudeste, o que tem levado ao desenvolvimento de estudos e incentivos nessa área pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE), que é vinculada ao Ministério de Minas e Energias (MME).

A EPE tem a função de realizar estudos e pesquisas para servir de base para o planejamento do setor energético do Brasil e, nos últimos anos, elaborou vários estudos, sendo um dos seus principais focos o aumento da capacidade de transmissão de energia elétrica da região Nordeste para o Sudeste (BRASIL, 2014a; BRASIL, 2014b; BRASIL, 2014c; BRASIL 2015c; BRASIL, 2015d) a fim de viabilizar o escoamento dos atuais e futuros empreendimentos de geração de energia do Nordeste.

## 5 RESULTADOS

A seguir são apresentados os resultados da projeção de 3 possíveis cenários: Cenário sem intervenção (Prognóstico), Cenário 01 com usinas WTE e Cenário 02 com usinas WTE.

### 5.1 Cenário sem intervenção (Prognóstico)

Em um cenário *do nothing*, no qual a atual gestão dos RSU no Nordeste permaneça inalterada, estimou-se tanto a área ocupada pelos resíduos sólidos urbanos quanto o volume das emissões de gases metano e carbônico gerados por estes resíduos em um período de 20 anos (2017 a 2036).

Utilizou-se a equação (3) considerando somente os RSU coletados na região. O valor de R usado foi de 281,415 (kg/hab/ano) - apontado pela ABRELPE (2015). Já os valores dos parâmetros L,  $\rho_{\text{bulk}}$  e H foram definidos através das recomendações apresentadas no estudo de Younes *et al* (2015); de acordo com

estes autores, o valor de  $800 \text{ kg/m}^3$  é comumente usado como densidade média dos resíduos ( $\rho_{\text{bulk}}$ ) em diversos estudos na área; o valor da altura dos amontoados de resíduos (H) deve variar entre 15 e 30 metros (usou-se o valor de 15 metros para projetar o pior cenário); já o tempo médio (L) mais comum de utilização de um aterro/lixão é 20 anos. No que diz respeito à população (P), foi utilizada a média de habitantes projetados pelo IBGE (2013) no período estudado (que é de 59.493.905 habitantes). Assim, de acordo com a equação (3), o cálculo da área demandada para a disposição de resíduos sólidos em aterros e lixões no Nordeste é:

$$\text{Área} = 281,415 \times 20 \times 59.493.905 \times 1,5 / (800 \times 15)$$

ou

$$\text{Área} = 41.856.193 \text{ m}^2 = 4.185,6 \text{ hectares.}$$

Chega-se à conclusão que, caso a atual gestão de RSU continue sem inovações, os RSU coletados no Nordeste, nos próximos 20 anos, ocuparão uma área total equivalente ao espaço ocupado por aproximadamente de 6.540 campos de futebol.

Em relação a geração de  $\text{CO}_2$  e  $\text{CH}_4$ , esta pesquisa utilizou a ferramenta *LandGEM* e adotou os critérios da USEPA (2005), que define os valores padrões de  $k = 0,05 \text{ (ano}^{-1}\text{)}$ ,  $L_0 = 170 \text{ (m}^3\text{/Mg)}$ , concentração de NMOC = 600 (ppmv hexano) considerando a inexistência de resíduos perigosos e volume de metano igual a 50%. O volume de entrada de RSU no aterro/lixão foi definido com base na quantidade coletada na região em 2015 (ABRELPE, 2016), sendo acrescido ao decorrer dos anos um percentual de 3,28 % em relação ao ano anterior; o valor médio deste percentual foi calculado através da média das taxas de crescimento anual da quantidade de RSU coletada nos anos de 2011, 2012, 2013 e 2014 no Nordeste (ABRELPE, 2012; 2013; 2014; 2015). A Tabela 1 mostra os valores anuais de volume de entrada em aterros e lixões no período de 2017 a 2036.

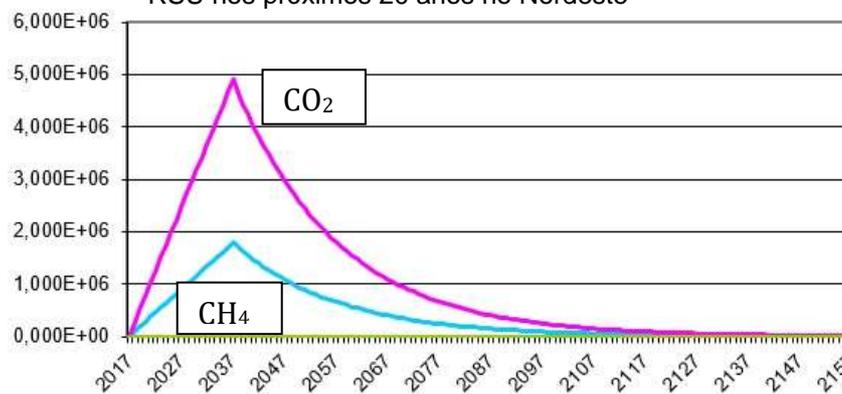
**Tabela 1** - Projeção de entrada de RSU em aterros/lixões no Nordeste (em t/ano)

2017	2018	2019	2020	2021
17.087.890	17.647.518	18.225.474	18.822.359	19.438.791
2022	2023	2024	2025	2026
20.075.411	20.732.881	21.411.883	22.113.122	22.837.327
2027	2028	2029	2030	2031
23.585.249	24.357.666	25.155.380	25.979.218	26.830.038
2032	2033	2034	2035	2036
27.708.721	28.616.182	29.553.362	30.521.235	31.520.805

Fonte: Elaborado pelos autores

Ao final da aplicação da ferramenta *LandGEM*, chegou-se aos valores de emissão de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> mostrados no Gráfico 3.

**Gráfico 3** - Estimativa de geração de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> (ton.) a partir do RSU nos próximos 20 anos no Nordeste



Fonte: Elaborado pelos autores

Considerou-se que não há captura de gases gerados nos aterros e lixões, ou seja, 100% do gás produzido é disposto no ambiente. Logo, estima-se que, nos próximos 20 anos, os aterros e lixões do Nordeste emitirão no ambiente um total aproximado de  $1,884 \times 10^7$  toneladas de gás metano e  $5,170 \times 10^7$  toneladas de gás carbônico. Além disso, constata-se que, mesmo depois de desativados no final do ano de 2036, os aterros/lixões ainda serão geradores de gases de efeito estufa por várias décadas, chegando a emitir um total de  $4,150 \times 10^7$  toneladas de gás metano e  $1,139 \times 10^8$  toneladas de gás carbônico, entre os anos de 2017 e 2157, provenientes dos RSU coletados entre 2017 e 2036.

## 5.2 Cenários com usinas WTE

Para estimar o potencial das usinas WTE no Nordeste, considerou-se dois cenários. No primeiro, 100% dos RSU coletados no Nordeste nos próximos 20 anos seriam tratados em usinas de incineração com processamento de 300 toneladas por dia cada, totalizando, em 2036, 288 usinas na região. Já no segundo cenário somente o RSU orgânico (51,4%) - de acordo com Brasil (2010) - seria tratado em 147 incineradores e o RSU restante continuaria destinado a aterros/lixões. Utilizou-se o valor de 90% para o percentual de redução da área necessária ao descarte de resíduos tratados em incineradores e o valor de 0,8 hectares para área de ocupação de um incinerador de 300 toneladas/dia (YAP E NIXON, 2015).

A área total ocupada pelo tratamento e disposição final dos RSU é igual ao espaço necessário para depositar os RSU não tratados e os rejeitos da incineração somado com a área ocupada pelas usinas WTE.

**Quadro 1-** Projeção de área ocupada pelas usinas WTE e pela disposição dos RSU coletados no Nordeste de 2017 a 2036

<b>Cenário 01</b>	100% dos RSU coletados são incinerados	Espaço necessário para depositar os RSU não incinerados	=	Área necessária para aterro/lixão	=	$0\% \times 41.856.193 \text{ m}^2$	=	0 m <sup>2</sup>
		Espaço necessário para depositar os resíduos da incineração	=	10% x (Área necessária para aterro/lixão)	=	$10\% \times 41.856.193 \text{ m}^2$	=	4.185.619 m <sup>2</sup>
		Área ocupada pelas usinas de incineração	=	288 x (Área ocupada por 1 usina de incineração)	=	$288 \times 8.000 \text{ m}^2$	=	2.304.000 m <sup>2</sup>
<b>ÁREA TOTAL</b>								<b>6.489.619 m<sup>2</sup></b>
<b>Cenário 02</b>	51,4% dos RSU coletados são incinerados (somente orgânicos)	Espaço necessário para depositar os RSU não incinerados	=	Área necessária para aterro/lixão	=	$48,6\% \times 41.856.193 \text{ m}^2$	=	20.342.110 m <sup>2</sup>
		Espaço necessário para depositar os resíduos da incineração	=	10% x (Área necessária para aterro/lixão)	=	$10\% \times (41.856.193 \text{ m}^2 \times 51,4\%)$	=	2.151.408 m <sup>2</sup>
		Área ocupada pelas usinas de incineração	=	148 x (Área ocupada por 1 usina de incineração)	=	$148 \times 8.000 \text{ m}^2$	=	1.184.000 m <sup>2</sup>
<b>ÁREA TOTAL</b>								<b>23.677.518 m<sup>2</sup></b>

**Fonte:** Elaborado pelos autores

O Quadro 1 mostra os resultados dos cenários 01 e 02. No cenário 01, onde 100% dos RSU coletados são tratados em usinas WTE, os cálculos apontam que a gestão dos RSU coletados no Nordeste nos próximos 20 anos ocuparia um total de 6.489.619 m<sup>2</sup> sendo 4.185.619 m<sup>2</sup> para depositar os resíduos da incineração e 2.304.000 m<sup>2</sup> ocupados por 288 usinas de incineração.

O cenário 02, no qual 51,4% dos RSU coletados são incinerados, ocuparia um espaço 3,65 vezes maior (23.677.518 m<sup>2</sup>), sendo necessários 20.342.110 m<sup>2</sup> para os RSU coletados que não são incinerados, 2.151.408 m<sup>2</sup> com o objetivo de depositar os resíduos da incineração e 1.184.000 m<sup>2</sup> a fim de instalar as usinas de incineração.

Por conseguinte, foi analisado as emissões de GEE nos cenários 1 e 2. Ao estudar as emissões de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>, projeta-se o seguinte cenário com a implantação das usinas WTE:

**Quadro 2** - Cenários de Projeção das emissões de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> geradas pelos RSU nas usinas de incineração no Nordeste de 2017 a 2036

Cenário 01	
CH <sub>4</sub>	= Zero
CO <sub>2</sub>	= RSU Total x 0,415 (JOHNKE, 2002) = 472.220.510 x 0,415 = 1,96E+08 ton.
Cenário 02	
CH <sub>4</sub>	= Zero
CO <sub>2</sub>	= RSU Orgânico x 0,415 (JOHNKE, 2002) = 242.721.342 x 0,415 = 1,01E+08 ton.

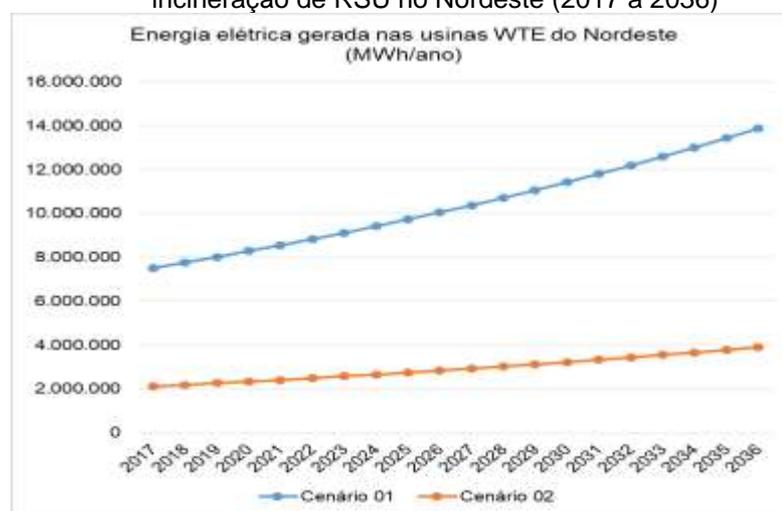
**Fonte:** Elaborado pelos autores

As projeções apresentadas no Quadro 2 levaram em consideração que o CH<sub>4</sub> não é gerado durante as operações normais da incineração e que a geração deste gás e do gás carbônico em aterros/lixão é originada 100% dos resíduos orgânicos. Logo, projeta-se que não existe emissão de CH<sub>4</sub> nos cenários 01 e 02 já que, em ambos os casos, todo RSU orgânico coletado nos próximos 20 anos serão incinerados. Em relação ao CO<sub>2</sub>, é estimado que as plantas de incineração gerem juntas em torno de 1,96 x 10<sup>8</sup> e 1,01 x 10<sup>8</sup> toneladas de CO<sub>2</sub>, nos cenários 01 e 02 respectivamente, enquanto os aterros/lixões nos dois cenários não geram CO<sub>2</sub>, porque neles são depositados somente resíduos não orgânicos.

Por fim, utilizou-se as equações 1 e 2 (SILVA, 2015) para estimar a energia elétrica produzida pelas usinas de incineração em cada cenário. No caso em estudo foi considerado:  $\eta_v = 33\%$  (USEPA, 2015);  $\eta_g = 98\%$  (SILVA, 2014);  $M_i(t)$  foi calculado a partir dos valores da Tabela 1; PC foi assumido como 90%; e PCI = 5,44 Mj/Kg (CORTEZ ET AL., 2008) e 2,98 MJ/Kg (FEAM, 2012) para o cenário 01 (PCI médio dos resíduos domiciliares no Brasil) e cenário 2 (PCI médio de resíduos orgânicos no Brasil), respectivamente.

O Gráfico 4 aponta os resultados da projeção de energia elétrica gerada pelas usinas de incineração de RSU no Nordeste, de 2017 a 2036. Estima-se que, ao final dos 20 anos, as usinas WTE do Nordeste produzam, no cenário 01, um total 207.694 GWh contra 58.480 GWh do cenário 2; ou seja, espera-se que o cenário 01 produza 2,55 vezes mais energia do que o cenário 2 devido ao maior processamento e maior PCI dos RSU do cenário 01. A geração média anual de energia do cenário 01 (10.385 GWh) representa em torno de 11% da atual produção de energia no Nordeste; enquanto, no cenário 02, a energia média gerada (2.924 GWh) representa 3%.

**Gráfico 3** - Projeção da energia elétrica gerada pelas usinas de incineração de RSU no Nordeste (2017 a 2036)



Fonte: Elaborado pelos autores

## 6 DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Ao compararmos as projeções do cenário sem intervenção e os cenários com usinas WTE é possível evidenciar o potencial de benefícios que estas usinas podem gerar aos setores ambiental e energético (Ver Quadro 3).

No parâmetro de ocupação de área pelos RSU, o cenário sem intervenção se destaca negativamente (cerca de 41,9 milhões de m<sup>2</sup>) chegando a necessitar 545% e 77% mais área do que os cenários 01 (cerca de 6,5 milhões de m<sup>2</sup>) e 02 (cerca de 23,7 milhões de m<sup>2</sup>), respectivamente. O impacto sobre a geração de gás metano, que é 21 vezes mais nocivo do que o CO<sub>2</sub> (NOBRE ET AL., 2012), é bastante

positivo nos cenários *com* usinas WTE porque evita a emissão de  $4,15 \times 10^7$  toneladas de CH<sub>4</sub> em relação ao cenário *sem* usinas WTE. Já a geração de gás carbônico é maior no cenário 01 ( $1,96 \times 10^8$  t), produzindo 72% e 94% mais CO<sub>2</sub> do que o cenário sem intervenção ( $1,139 \times 10^8$  t) e o cenário 02 ( $1,01 \times 10^8$  t), respectivamente.

Por fim, a geração de energia é mais estimulada no cenário 01 (207.694 GWh), enquanto o cenário 02 produz 72% menos energia elétrica (58.480 GWh); no cenário *sem* usinas WTE não há produção de energia elétrica a partir dos RSU. Em média, a energia gerada anualmente no cenário 01 (10.385 GWh/ano) conseguiria abastecer cerca de 7,15 milhões de residências em um ano, enquanto no cenário 02 (2.924 GWh/ano) seria possível suprir cerca de 2,01 milhões de domicílios.

**Quadro 3** - Impactos em diferentes cenários de gestão dos RSU do Nordeste (2016 a 2035)

CENÁRIO SEM USINAS WTE	CENÁRIO SEM INTERVENÇÃO (PROGNÓSTICO)	SETOR AMBIENTAL			SETOR ENERGÉTICO
		OCUPAÇÃO DE ÁREA PELA GESTÃO DOS RSU (m <sup>2</sup> )	GERAÇÃO DE GÁS METANO DOS RSU (Ton.)	GERAÇÃO DE GÁS CARBÔNICO DOS RSU (Ton.)	GERAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA A PARTIR DOS RSU (Gwh)
		41.856.193	4,15E+07	1,139E+08	0
CENÁRIO COM USINAS WTE	CENÁRIO 01	6.489.619	0	1,96E+08	207.694
	CENÁRIO 02	23.677.518	0	1,01E+08	58.480

**Fonte:** Elaborado pelos autores

No primeiro momento, em comparação ao cenário *sem* intervenção e ao cenário 02, o cenário 01 mostra-se uma boa opção para regiões que possuem pouca disponibilidade de área já que seus resultados mostram um impacto bem mais positivo sobre a ocupação de área pela gestão dos RSU. Entretanto, este parâmetro não é uma restrição para o Nordeste e, além disso, a Política Nacional de Resíduos Sólidos (BRASIL, 2010) deixa claro que a reciclagem é prioridade em relação ao tratamento de resíduos para aproveitamento energético sendo que, no cenário 01, 100% dos resíduos recicláveis são incinerados. O cenário 02 também apresenta um impacto positivo considerável sobre a ocupação de área para gestão dos resíduos e sobre a geração de energia a partir de RSU; no entanto, diferentemente do cenário 01, não se incinera os resíduos recicláveis, sendo possível utilizá-los produtivamente. Ademais, o cenário 02 conseguiu melhores resultados na mitigação da emissão dos GEE (CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>).

## 6 CONCLUSÕES

A implantação de usinas WTE no Nordeste brasileiro possui grande potencial de geração de benefícios ambientais e de acréscimo da oferta de energia elétrica. Este estudo estimou e comparou, dentro de um período de 20 anos (2017 até 2036) e em três diferentes cenários, os resultados de área ocupada pela gestão dos RSU, de emissão de gases de efeito estufa (CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub>) e de geração de energia elétrica a partir de resíduos sólidos urbanos no Nordeste do Brasil.

Baseado nos resultados obtidos, a implantação de usinas WTE para incinerar os RSU orgânicos (cenário 02) destaca-se pelo fato de obter considerável diminuição da área ocupada pela gestão dos RSU, grande decréscimo da geração de CH<sub>4</sub> e CO<sub>2</sub> e relevante acréscimo da produção de energia elétrica. Além disso, o cenário 02 sobressai-se por evitar a incineração dos resíduos recicláveis estando de acordo com o que reza a Política Nacional de Resíduos Sólidos.

A projeção de impactos realizada neste estudo gerou informações úteis que servem de base para o planejamento e tomada de decisões na área de gestão de RSU e no setor de energia elétrica no país. Esta pesquisa também constitui uma contribuição para estimar e comparar impactos na esfera ambiental e no setor de energia de outras regiões, podendo-se adicionar à pesquisa outros impactos que sejam considerados importantes para servir de estrutura de avaliação no processo de gestão do setor de RSU no Brasil.

## REFERÊNCIAS

- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2015**. 2016. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2015.pdf>. Acesso em: 04 ago. 2017.
- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2014**. 2015. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2014.pdf>. Acesso em: 04 mai. 2017.
- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2013**. 2014. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2013.pdf>. Acesso em: 04 mai. 2017.
- ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2012**. 2013. Disponível em: <http://www.abrelpe.org.br/Panorama/panorama2012.pdf>. Acesso em: 04 maio 2017.

ABRELPE - Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais. **Panorama dos resíduos sólidos no Brasil 2011**. 2012. Disponível em: <http://a3p.ibri.gov.br/pdf/ABRELPE%20Panorama%202001%20RSU-1.pdf>. Acesso em: 04 mai. 2017.

ARRUDA, J. B. F. **Estudos prospectivos sobre o desenvolvimento do Nordeste: Tema IV - Infraestrutura Econômica e Logística**. IICA/BNB. Jun. 2014.

BHATTACHARYA, A.; ROMANI, M.; STERN, N. **Infrastructure for development: meeting the challenge**. Policy Brief. Global green growth institute. 2012. Disponível em: [http://gggi.org/wp-content/uploads/2013/01/Policy+Brief\\_2013\\_pb1.pdf](http://gggi.org/wp-content/uploads/2013/01/Policy+Brief_2013_pb1.pdf). Acesso em: 10 mai. 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME) 2015a. **Balço Energético Nacional (BEN) 2015: Ano base 2014**. Rio de Janeiro: Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: [https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio\\_Final\\_BEN\\_2015.pdf](https://ben.epe.gov.br/downloads/Relatorio_Final_BEN_2015.pdf). Acesso em: 16 mai. 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME) 2015b. **Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2015: Ano base 2014**. Rio de Janeiro, 2015: Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: <http://www.epe.gov.br/AnuarioEstatisticodeEnergiaEletrica/Forms/Anurio.aspx>. Acesso em: 18 mai. 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME) 2015c. **Estudos para a licitação da expansão da transmissão: Programa de Expansão da Transmissão (PET)/Plano de Expansão de Longo Prazo (PELP)**. Rio de Janeiro, 2015: Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: [http://www.epe.gov.br/Transmissao/Documents/EPE-DEE-RE-124\\_2015-rev0%20%28PET\\_PELP%202015-2020\\_2%C2%BA%20Semestre%29%20-%2031ago2015.pdf](http://www.epe.gov.br/Transmissao/Documents/EPE-DEE-RE-124_2015-rev0%20%28PET_PELP%202015-2020_2%C2%BA%20Semestre%29%20-%2031ago2015.pdf). Acesso em: 21 mai. 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME) 2015d. **Estudos para a licitação da expansão da transmissão: Estudo para Escoamento do Potencial Eólico dos Estados do Maranhão, Piauí e Ceará**. Rio de Janeiro, 2015: Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: <http://www.epe.gov.br/Transmissao/Documents/EPE-DEE-RE-021-2015-rev0.pdf>. Acesso em: 21 mai. 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME) 2014a. **Estudos para a licitação da expansão da transmissão: Expansão das interligações N-SE e NE-SE para atender a cenários extremos de exportação das regiões N e NE- concepção inicial de alternativas**. Rio de Janeiro, 2014: Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: [http://www.epe.gov.br/Transmissao/Documents/EPE-DEE-RE-146\\_2014-rev0\\_INTERLIGACOES.PDF](http://www.epe.gov.br/Transmissao/Documents/EPE-DEE-RE-146_2014-rev0_INTERLIGACOES.PDF). Acesso em: 21 mai. 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME) 2014b. **Estudos para a licitação da expansão da transmissão: Aumento da Capacidade de Transmissão da Interligação Nordeste-Sudeste**. Rio de Janeiro, 2014: Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: [http://www.epe.gov.br/Transmissao/Documents/EPE-DEE-RE-148\\_2014-rev1%28Aumento%20da%20Capacidade%20de%20Transmiss%C3%A3o%20da%20Interliga%C3%A7%C3%A3o%20Nordeste-Sudeste%29%20-%2008dez2014.pdf](http://www.epe.gov.br/Transmissao/Documents/EPE-DEE-RE-148_2014-rev1%28Aumento%20da%20Capacidade%20de%20Transmiss%C3%A3o%20da%20Interliga%C3%A7%C3%A3o%20Nordeste-Sudeste%29%20-%2008dez2014.pdf). Acesso em: 21 mai. 2017.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia (MME) 2014c. **Estudos para a licitação da expansão da transmissão: Estudo para Escoamento do Potencial Eólico da Área Leste da**

Região Nordeste. Rio de Janeiro, 2014: Empresa de Pesquisa Energética (EPE). Disponível em: [http://www.epe.gov.br/Transmissao/Documents/EPE-DEE-RE-147-2014-rev3%28Leste\\_NE%29-SMA.pdf](http://www.epe.gov.br/Transmissao/Documents/EPE-DEE-RE-147-2014-rev3%28Leste_NE%29-SMA.pdf) . Acesso em: 21 mai. 2017.

BRASIL. **Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS)**. Lei Federal Número 12.305 de 2010. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2007-2010/2010/lei/l12305.htm). Acesso em: 04 maio 2017.

BRUNNER, P. H.; RECHBERGER, H. Waste to energy: key element for sustainable waste management. **Waste Management**. v.37, p. 3-12, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.02.003>

CEWEP. Confederation of European Waste to Energy Plants. **Heating and lighting the way to sustainable future: energy efficiency e climate protection**. 2013. Disponível em: [http://www.cewep.eu/m\\_1073](http://www.cewep.eu/m_1073). Acesso em: 16 de mai. 2017.

CICERI, H. N. **Tecnologías emergentes para el tratamiento de residuos urbanos: el caso plasma térmico**. Área de administración industrial e innovación tecnológica. Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM. 2014. Disponível em: <http://informatica.fquim.unam.mx/ciceri/files/TECNOLOGIAS%20EMERGENTES%20PARA%20EL%20TRATAMIENTO%20DE%20LOS%20RESIDUOS%20URBANOS.pdf>. Acesso em: 20 maio 2017.

CHEN, D.; YIN, L.; WANG, H.; HE, P. Pyrolysis technologies for municipal solid waste: a review. **Waste Management**. v.34, p. 2466-2486, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.004>

CHO, H. S.; MOON, H. S.; KIM, J. Y. Effect of quantity and composition of waste on the prediction of annual methane potential from landfills. **Bioresource Technology**. v.109, p. 86–92, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.01.026>

CORTEZ, L. A., LORA E. S., ALYARZA, J. A. C. **Biomassa para energia**. Editora Unicamp, 2008.

FEAM. Fundação Estadual do Meio Ambiente. **Aproveitamento Energético de resíduos sólidos urbanos: guia de orientação para governos municipais de Minas Gerais**. Fundação Estadual do Meio Ambiente. Belo Horizonte: FEAM, 2012.

FEAM. Fundação Estadual de Meio Ambiente. **Estudo do estado da arte e análise de viabilidade técnica, econômica e ambiental da implantação de uma usina de tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica no estado de Minas Gerais: Relatório 1 - Estado da arte do tratamento térmico de resíduos sólidos urbanos com geração de energia elétrica**. 2. ed. Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <http://www.feam.br/images/stories/fean/relatorio%201%20%20estado%20da%20arte%20do%20tratamento%20termico.pdf>. Acesso em: 17 mai. 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Projeções 2013 população**. 2013. Disponível em: [http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/projecao\\_da\\_populacao/2013/default\\_tab\\_shtm](http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/projecao_da_populacao/2013/default_tab_shtm). Acesso em: 17 mai. 2017.

JOHNKE, B. **Emissions from waste incineration**. Good Practice Guidance and Uncertainty Management in National Greenhouse Gas Inventories. Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. p. 455-468, 2002.

JORNAL DA UNICAMP. **Ideias acessas**: edição especial sobre a crise energética. Universidade Estadual de Campinas - Unicamp. Campinas, julho de 2001, ANO XV, Nº 164. Disponível em: [http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp\\_hoje/ju/jornalPDF/ju164.pdf](http://www.unicamp.br/unicamp/unicamp_hoje/ju/jornalPDF/ju164.pdf). Acesso em: 22 maio 2017.

KARANJEKAR, R. V.; BHATT, A.; ALTOUQUI, S.; JANGIKHATOONABAD, N.; DURAI, V.; SATTLER, M. L.; HOSSAIN, M.D. S.; CHEN, V. Estimating methane emissions from landfills based on rainfall, ambient temperature, and waste composition: the CLEEN model. **Waste Management**. v.46, p. 389-398, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.030>

LOMBARDI, L.; CARNEVALE, E.; CORTI, A. A review of technologies and performances of thermal treatment systems for energy recovery from waste. **Waste Management**. v.37, p. 26-44, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.010>

MASSARUTTO, A. Economic aspects of thermal treatment of solid waste in a sustainable WM system. **Waste Management**. v.37, p. 45-57, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.08.024>

MORABITO, R.; PUREZA, V. – Modelagem e simulação. In MIGUEL, P. A. C. (coord.) - **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 2.<sup>a</sup> ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012.

NOBRE, C. A.; REID, J.; VEIGA, A. P. S. **Fundamentos científicos das mudanças climáticas**. São José dos Campos, SP: Rede Clima/INPE, 2012. 44 p.

OLIVEIRA, L. B.; ROSA, L P. Brazilian waste potential: energy, environmental, social and economic benefits. **Energy policy**. v.31, p. 1481-1491, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-4215\(02\)00204-5](https://doi.org/10.1016/S0301-4215(02)00204-5)

RENTIZELAS, A. A.; TOLIS, A. I.; TATSIOPOULOS, I. P. Combined municipal solid waste and biomass system optimization for district energy applications. **Waste Management**. v.34, p.36-48, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.09.026>

SILVA, E. R. S. **Estimativa do potencial energético dos resíduos sólidos urbanos por diferentes rotas de tratamento**. Tese (Pós-graduação em Energia) - Universidade Federal do ABC - Santo André – São Paulo, 2015.

SILVA, E. R.; JUNIOR, S. N. V.; TONELLI, J. T. C. L.; MARTINS, G. Estimativa do potencial de conversão energética de resíduos sólidos urbanos através do processo de incineração. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v. 18, p. 09-16, 2014.

THEMELIS, N. J.; BARRIGA, M. E. D.; ESTEVEZ, P.; VELASCO, M. G. **Guidebook for the application of waste to energy technologies in Latin America and the Caribbean**. Earth Engineering Center, Columbia University. Julho, 2013. Disponível em: [http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/files/WTEGuidebook\\_IDB.pdf](http://www.seas.columbia.edu/earth/wtert/files/WTEGuidebook_IDB.pdf). Acesso em: 15 mai. 2017.

TURNER, D.A.; KEMP, S.; WILLIAMS, I. Carbon footprinting in the UK waste management sector. **Carbon Management**. v.2, p. 677–690, 2011. DOI: <https://doi.org/10.4155/cmt.11.67>

USEPA – UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **LFG Energy Project Development Handbook, 2015**. Disponível em: [http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/pdf\\_full.pdf](http://www.epa.gov/lmop/documents/pdfs/pdf_full.pdf). Acesso em: 14 mai. 2017.

USEPA - UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Landfill Gas Emissions Model v.3.02**. 2005. Disponível em: <<http://www.epa.gov/ttn/catc/dir1/landgem-v302.xls>>. Acesso em: 09 de mai. 2017.

WASTE ATLAS. **Interactive Map**: WTE plants. Disponível em: <http://www.atlas.d-waste.com/>. Acesso em: 17 mai. 2017.

WORLD BANK. **Countries**: página institucional. 2014. Disponível em: <http://www.worldbank.org/en/country>. Acesso em: 02 mai. 2017.

WENJING, L.; ZHENHAN, D.; DONG, L.; JIMENEZ, L. M. C.; YANJUN, L.; HANWEN, G; HONGTAO, W. Characterization of odor emission on the working face of landfill and establishing of odorous compounds index. **Waste Management**. v.42, p. 74-81, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.04.030>

YAP H.Y.; NIXON J.D. A multi-criteria analysis of options for energy recovery from municipal solid waste in India and the UK. **Waste Management**, v.46, p. 265-277, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.08.002>

YOUNES, M. K.; NOPIAH, Z. M.; BASRI, N. E. A.; BASRI, H.; ABUSHAMMALA, M. F. M.; YOUNES, M. Y. Landfill area estimation based on integrated waste disposal options and solid waste forecasting using modified ANFIS model. **Waste Management**, v. 55, p. 3-11, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.10.020>



Artigo recebido em: 15/08/2017 e aceito para publicação em: 06/11/2018  
DOI: <http://dx.doi.org/10.14488/1676-1901.v18i4.2975>