



TR A B A L H O 3 0

POTENCIAL DOS RSU NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA E NA ECONOMIA CIRCULAR: UMA ANÁLISE COMPARATIVA DE CENÁRIOS PARA O CONSÓRCIO LOCALIZADO NA REGIÃO DOS LAGOS

Diego Macedo Veneu

André Rodrigues Pereira

Alexandre Lioi Nascentes

Felipe Sombra dos Santos

Gisele Martins da Rocha

Isabelle Santux Mendes Pereira

Kauã Machado Siqueira

Marcello Amaral de Oliveira

Maria Eduarda da Silva Barreto

Maria Luisa Pinheiro da Rocha

Mário Jorge Mello Abrahim Fernandes

Raquel de Souza Baltar

RESUMO: O trabalho analisa o aproveitamento energético dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) de 8 municípios que integram o consórcio do Aterro Sanitário de Dois Arcos, propondo dois cenários: o atual (Cenário I), baseado no aproveitamento do metano gerado no aterro de 100% dos RSU, e um alternativo (Cenário II), que incorpora a reciclagem de materiais como papel/papelão, plásticos, metais e vidros. Utilizando dados de geração e composição dos RSU de 2025 a 2040, foram estimados ganhos energéticos e redução de emissões de CH₄, resultando nos valores de 16.964 MWh/dia para o Cenário II e de 1.694 MWh/dia para o Cenário I, indicando que a reciclagem, somada ao aproveitamento do biometano, proporciona maior geração de energia e contribui para a transição energética e a economia circular, além de ampliar a vida útil dos aterros.

PALAVRAS-CHAVE: Resíduo Sólido Urbano, Energia, Aterro Sanitário, Reciclagem

INTRODUÇÃO

Segundo ABREMA (2024) no Brasil, cada habitante gerou, em média, 1,047 kg de Resíduo Sólido Urbano (RSU) por dia em 2023, culminando em uma geração anual estimada de aproximadamente 81 milhões de toneladas de RSU. Após a implementação da Lei 12.305 de 2010 (Brasil, 2010) que estimulou à implantação de consórcios intermunicipais com vistas à viabilização de soluções conjuntas na área de resíduos sólidos, houve uma grande adequação dos municípios em relação ao tratamento e a disposição final ambientalmente adequada de seus resíduos. No Brasil, do total de RSU coletados, cerca de 55% são dispostos em aterros sanitários, 38,4% em lixões/aterros controlados e somente 6% enviados a centrais de triagem de recicláveis (ABREMA, 2024).

O Plano Nacional de Resíduos Sólidos (Planares), instituído por meio do Decreto nº 11.043, de 13 de abril de 2022, é um importante instrumento da Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) pois apresenta um caminho para se alcançar os objetivos e materializar a PNRS por meio de diretrizes, estratégias, ações e metas para melhorar a gestão de resíduos sólidos no País. Além do encerramento de todos os lixões, é previsto o aumento da recuperação de resíduos para cerca de 50% em 20 anos. Assim, metade do “lixo” gerado deverá deixar de ser aterrado e passará a ser reaproveitado por meio da reciclagem, compostagem, biodigestão e recuperação energética (Brasil, 2022).

Neste contexto, fica claro que o Brasil ainda está em fase de transição, saindo de um sistema exclusivo de disposição inadequada (lixão/aterro controlado) de RSU e caminhando para um modelo mais sustentável, com a disposição em aterros sanitários, além de iniciativas como o aproveitamento energético a partir do biogás e a ampliação das centrais de reciclagem. De acordo com Pereira Jr. (2020) a prática estabelecida nos conceitos associados a redução, reutilização, recuperação e reciclagem de materiais e energia podem contribuir para a diminuição da extração de recursos naturais, evitando-se o descarte de resíduos em aterros sanitários e reduzindo a pressão sobre o meio ambiente, contribuindo também para atingir a meta referente aos Objetivos do Desenvolvimento Sustentável - ODS nº 12 que tem entre suas metas a redução da geração de resíduos e a ampliação da reciclagem e reutilização (ONU, 2023).

Em muitos aterros sanitários como o de Dois Arcos, que recebe os RSU dos municípios de São Pedro da Aldeia, Cabo Frio, Arraial do Cabo, Armação dos Búzios, Araruama, Iguaba Grande, Casimiro de Abreu e Silva Jardim, já é realizado o aproveitamento energético do biogás, entretanto, uma boa parte destes RSU dispostos, ainda são passíveis de serem reciclados. Dentro de uma visão mais abrangente, o aproveitamento energético de RSU compreende também a reciclagem do material coletado que a isto se presta, como papel/papelão, vidros, plásticos,

borrachas e metais. Deve-se considerar que a reciclagem permite a substituição de insumos para cuja produção há, normalmente, grande consumo de energia. Por aliviar pressões de demanda de matérias-primas, inclusive recursos naturais, e de energia, a reciclagem se constitui, em princípio, em uma forma ambientalmente eficiente de aproveitamento energético de RSU (EPE, 2008).

OBJETIVO

O presente estudo apresenta 2 cenários de aproveitamento energético dos RSU para os municípios que atualmente fazem parte do consórcio que dispõem seus resíduos no Aterro Sanitário de Dois Arcos. A elaboração dos cenários tem como finalidade a comparação do atual modelo (Cenário I) com um novo modelo (Cenário II) demonstrando quais seriam os ganhos futuro com a implementação deste novo modelo que envolve o ganho energético adicional com a reciclagem dos materiais que hoje são destinados diretamente ao aterro, além do atual ganho que provém da queima do biometano proveniente do aterro.

METODOLOGIA

Um levantamento da quantidade e composição do RSU dos municípios de São Pedro da Aldeia, Cabo Frio, Arraial do Cabo, Armação dos Búzios, Araruama, Iguaba Grande, Casimiro de Abreu e Silva Jardim partindo do ano base de 2025 até o ano de 2040 foi realizado para gerar os dados iniciais que serão inseridos nos cálculos para gerar os valores de ganhos energéticos frente a reciclagem e ao aproveitamento do gás metano proveniente do aterro bioenergético.

Posteriormente serão apresentadas as metodologias para estimar as emissões de CH_4 de aterros e da energia elétrica potencialmente acumulada a partir do uso de material reciclável, possibilitando assim, a construção do “Cenário I” proveniente do ganho energético do metano gerado do aterramento de 100% do RSU gerado no consórcio (atual cenário) e do “Cenário II” proveniente do potencial ganho energético com a reciclagem de materiais como papel/papelão, plástico, metal e vidro que geralmente são depositados no aterro e do metano gerado da fração orgânica do RSU dos municípios.

Determinação da População e Quantidade de RSU por Município

Para a estimativa da população dos municípios que faz parte do consórcio, foram levantados os dados obtidos através dos censos dos anos de 1991, 1996, 2000, 2007, 2010 e 2022 (IBGE, 2025). Com base nos dados censitários (Tabela 1), foi possível calcular a projeção populacional para o horizonte proposto (2025 a 2040) a partir da taxa de crescimento populacional médio utilizando-se o método matemático de projeção aritmética de acordo com a Equação 1.

$$P_t = P_0 \cdot k_a(t - t_0) \quad (1)$$

Onde: P_t é população no ano t (hab.); P_0 é a população no ano t_0 (hab.); k_a é a taxa de crescimento; t e t_0 é o tempo (ano).

A quantidade de RSU gerado a cada ano é determinada pelo produto da multiplicação da população em cada ano t pela geração per capita de RSU dos municípios. Foram realizados levantamentos através do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS) de cada município a fim de se obter a geração per capita média (kg RSU/hab.dia). A Tabela 2 mostra os valores obtidos para cada um dos municípios do consórcio.

Tabela 1. Valores dos Censos de 1991 a 2022 da População de Cada Município Utilizados nas Projeções

Município	População (hab.)					
	1991	1996	2000	2007	2010	2022
São Pedro da Aldeia	50474	65072	63227	75869	87875	104029
Cabo Frio	84750	115020	126828	162229	186227	222161
Arraial do Cabo	19865	21458	23877	25248	27715	30986
Armação dos Búzios	-	-	18204	24560	27560	40006
Araruama	59025	65691	82803	98268	112008	129671
Iguaba Grande	-	-	15089	19716	22851	27920
Casimiro de Abreu	-	20058	22152	27086	35347	46110
Silva Jardim	18140	19002	21265	21362	21349	21352

Fonte: IBGE (2025)

Tabela 2. Valores de Geração Per Capita de RSU dos Municípios do Consórcio

Município	Geração Per Capita (kg/hab.dia)
São Pedro da Aldeia	1,15
Cabo Frio	1,36
Arraial do Cabo	2,14
Armação dos Búzios	2,14
Araruama	0,70
Iguaba Grande	1,04
Casimiro de Abreu	0,78
Silva Jardim	1,09

Fonte: SNIS (2022)

Composição Gravimétrica dos RSU dos Municípios do Consórcio

A quantidade de RSU é função do tamanho, da renda das famílias e das características socioculturais de cada município. Contudo, não são claras ou evidentes as relações entre a quantidade de RSU produzida e estes parâmetros. Talvez, mais claramente do que a produção, a composição média do RSU produzido guarda maior relação com o nível de vida ou a renda média da população. A Tabela 3 apresenta a composição gravimétrica adotada dos RSU dos municípios do consórcio obtidas a partir dos Planos Municipais de Saneamento Básico que serão adotadas para a construção dos Cenários I e II.

Tabela 3. Composição Gravimétrica dos RSU dos Municípios do Consórcio

Fração	Componente	Composição Gravimétrica (%)	Fração	Componente	Composição Gravimétrica (%)
Orgânica	Matéria Orgânica	51,4	Inorgânica		
	Papel/Papelão	13,1		Alumínio	0,6
	Plástico Filme	8,9		Aço	2,3
	Plástico Rígido	4,6		Vidro	2,4
	Outros	16,7			

Fonte: Serenco, 2013

Estimativas de Produção de Metano

Para o cálculo do potencial de geração de metano no aterro foi utilizada a metodologia sugerida pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change* - IPCC (2006) a partir de dados obtidos e estimados dos RSU. A metodologia do IPCC para estimar as emissões de CH_4 de aterros é baseado no método de Degradação de Primeira Ordem (FOD). Este método assume que o componente orgânico degradável (carbono orgânico degradável, DOC) dos resíduos decai lentamente ao longo de algumas décadas, durante o qual CH_4 e CO_2 são formados. Se as condições são constantes, a taxa de produção de CH_4 depende unicamente da quantidade de carbono remanescente nos resíduos. Como as emissões de CH_4 são resultantes dos resíduos sólidos depositados nos aterros, nos primeiros anos após a deposição, a geração é alta, com o declínio de carbono degradável no resíduo ao longo dos anos pelas bactérias, ou seja, as emissões de CH_4 decaem gradativamente.

Para o cálculo da estimativa do potencial de emissão de CH_4 proveniente do Aterro Sanitário de Dois Arcos foi utilizada a metodologia do IPCC (2006) a partir de dados obtidos e estimados dos RSU dos municípios que fazem parte do consórcio. Portanto, têm-se as seguintes equações:

$$DDOC_m = W \cdot DOC \cdot DOC_f \cdot MCF \quad (2)$$

Onde: $DDOC_m$ é a massa de DOC decomposto depositado (t); W é a massa de resíduos depositados (t); DOC é o carbono orgânico degradável no ano de deposição (fração); DOC_f é a fração de DOC que pode se decompor (fração); e MCF é o fator de correção de CH_4 para a decomposição aeróbia no ano de deposição (1,0 para aterros bem gerenciados).

$$DOC = 0,4A + 0,17B + 0,15C + 0,3D \quad (3)$$

Em função das grandes quantidades de alimentos e resíduos orgânicos que são depositados juntos, a Equação 3 foi modificada para:

$$DOC = 0,4A + 0,16(B + C) + 0,3D \quad (4)$$

Onde: A é a fração de papel/papelão e tecidos; $B+C$ é a fração de alimentos e outros resíduos orgânicos; e D é a fração de resíduos de madeira.

$$DOC_f = 0,014T + 0,28 \quad (5)$$

Onde: T é a temperatura ($^{\circ}C$) na zona anaeróbia dos resíduos (estimada em $35^{\circ}C$).

A Equação 6 mostra o cálculo para obtenção da massa de DOC acumulado ao final de cada instante t no aterro, ao longo dos anos e a Equação 7 a massa total de material em decomposição, em cada instante t , presente no aterro.

$$DDOC_{maT} = DDOC_m + (DDOC_{maT-1} \cdot e^{-k}) \quad (6)$$

$$DDOC_{m\,decomp_T} = DDOC_{maT-1} \cdot (1 - e^{-k}) \quad (7)$$

Onde: T é o ano do inventário; $DDOC_{maT} = DDOC_m$ acumulado no aterro no final do ano T (t); $DDOC_{maT-1} = DDOC_m$ acumulado no aterro no final do ano $(T-1)$ (t);

$DDOC_m = DDOC_m$ depositados no aterro no ano T (t); $DDOC_{m\,decomp_T} = DDOC_m$ decomposto no aterro no ano T (t); k é a constante de reação (ano^{-1}) sendo

$$k = \frac{\ln 2}{t_{1/2}}; \text{ e } t_{1/2} \text{ é o tempo de meia-vida (9 anos).}$$

A quantidade de CH_4 gerado a partir do $DDOC_m$ que se decompõe é calculada a partir da Equação 8:

$$CH_{4gerado_T} = \left(DDOC_{m\,decomp_T} \cdot F \cdot \frac{16}{12} \cdot R \right) \cdot (1 - OX) \quad (8)$$

Onde: $CH_{4geradoT}$ é a quantidade de CH_4 gerado a partir do material decomposto (t); $DDOC_{mdecompT} = DDOCm$ decomposto no ano T (t); F é a fração de CH_4 em volume no gás de aterro gerado (estimado em 50%); 16/12 é a relação peso molecular CH_4/C ; R é o percentual de recuperação de metano (estimado em 60%) e OX é o fator de oxidação (estimado em 0,1).

Para a determinação da potência e energia disponível foram utilizadas as Equações 9 e 10, respectivamente:

$$P = \frac{Q \cdot PCI \cdot \eta}{860000} \quad (9)$$

$$E = P \cdot Rend \cdot Temp \cdot Op. \quad (10)$$

Onde: P é a potência disponível (MW); PCI é o Poder Calorífico Inferior do metano (estimado 8.500 kcal/m³CH₄); η é a eficiência da coleta dos gases (estimado em 75%); 860.000 é a conversão de kcal para MW; E é a energia disponível (MWh/dia); Rend é o rendimento de motores operando a plena carga (estimado em 30%); e Temp.Op. é o tempo de operação do motor (24 horas/dia).

Estimativas de Energia Conservada

Em maior ou menor grau, a reciclagem permite acumular uma conservação de energia por vezes expressiva e, neste sentido, deve ser considerada como parte de uma estratégia de aproveitamento energético de RSU. A estimativa da energia elétrica conservada a partir do uso de material reciclável como matéria-prima requer a definição de fatores de conversão, geralmente expressos em MWh/t ou kWh/kg, em cuja determinação podem ser utilizadas diferentes critérios e abordagens metodológicas como as de alguns autores como Calderoni (1996), Morris (1996), EPA (2007) e Warnken ISE (2007). A Tabela 4 mostra os índices contidos em cada uma destas metodologias que permitem estimar índices de energia elétrica conservada, dos principais materiais recicláveis.

Tabela 4. Potencial de conservação de energia elétrica a partir da reciclagem de componentes encontrados nos RSU

Material	Índice de Energia Elétrica Conservada (MWh/t)			
	Calderoni	Morris	EPA	Warnken ISE
Papel/Papelão	3,51	1,75	2,95	1,37
Plástico	5,06	5,55	15,39	5,91
Metal	5,3	3,25	5,85	2,67
Vidro	0,64	0,08	0,62	1,25

Fonte: Calderoni (1996); Morris (1996); EPA (2007); Warnken ISE (2007)

RESULTADOS

Quantidade de Resíduo Sólido Urbano Gerado pelo Consórcio

A Tabela 5. mostra a estimativa da população e quantidade de RSU gerada pelos municípios que compõem o consórcio a partir dos dados populacionais, da projeção populacional e geração per capita levando em consideração o horizonte de adequação as novas metas definidas no Planares do ano vigente 2025 até 2040.

A partir dos valores apresentados na Tabela 5 pode-se observar que o total populacional dos 8 municípios que compõem o consórcio apresentará uma faixa de 670075 a 845582 habitantes e uma geração de RSU de 295484 a 373234 t, o que corresponde a uma geração per capita média de 1,2 kg/hab.dia. Segundo Monteiro (2001), para esse extrato populacional (500 mil a 5 milhões) a quantidade de RSU enviado ao aterro é componível a população de grandes cidades que em teoria apresentaria uma geração per capita de RSU de 0,8 a 1,0 kg/hab.dia, porém, apresenta uma geração per capita acima de 1,0 kg/hab.dia, configurando-se como uma grande megalópole.

Tabela 5. Evolução da População e da Quantidade de RSU do Consórcio

Consórcio		
Ano	População (hab)	Quantidade RSU (t)
2025	670075	295484
2026	681775	300667
2027	693476	305850
2028	705176	311034
2029	716877	316217
2030	728577	321400
2031	740278	326584
2032	751978	331767
2033	763678	336950
2034	775379	342134
2035	787079	347317
2036	798780	352500
2037	810480	357684
2038	822181	362867
2039	833881	368050
2040	845582	373234

Composição Gravimétrica dos RSU do Consórcio

A Tabela 6 mostra a composição gravimétrica mássica dos RSU do consórcio para o horizonte de 2025 a 2040. A partir dos valores de composição gravimétrica (%) da Tabela 3 e da quantidade de RSU da Tabela 5 foi possível obter os valores utilizados para os cálculos de massa (t) de RSU para o Cenário I (Alimentos/Orgânicos, Madeiras e Papel/Papelão) que leva em consideração a geração de metano a partir da fração orgânica dos RSU enviados ao aterro e Cenário II (Alimentos/Orgânicos e Madeiras + Papel/Papelão, Plástico, Metal e Vidro) que leva em consideração a fração orgânica que não pode ser “reciclada” + os materiais que são passíveis de reciclagem.

A Tabela 6 mostra os valores mássicos para cada fração (composição gravimétrica) ao longo dos anos, delineada para o cálculo dos cenários, sendo possível observar que 51,4% correspondem a fração Alimento/Orgânicos, 16,7% a fração Madeiras, 13,1 a fração Papel/Papelão, 13,5% a fração Plástico, 2,9% a fração Metal e 2,4% a fração Vidro. Segundo SISEMA (2017) a composição gravimétrica média dos RSU gerados nos municípios de Minas Gerais apresentaram 39,24% restos de alimentos, 6,46% de poda e madeira, 11,52% de papel, 13,58% de plástico, 1,39% de metal e 2,66% de vidro.

Tabela 6. Composição Gravimétrica Mássica dos RSU do Consórcio

Ano	Composição Gravimétrica (t)					
	Alimentos/Orgânicos	Madeiras	Papel/Papelão	Plástico	Metal	Vidro
2025	151879	49346	38708	39890	8569	7092
2026	154543	50211	39387	40590	8719	7216
2027	157207	51077	40066	41290	8870	7340
2028	159871	51943	40745	41990	9020	7465
2029	162536	52808	41424	42689	9170	7589
2030	165200	53674	42103	43389	9321	7714
2031	167864	54539	42782	44089	9471	7838
2032	170528	55405	43461	44789	9621	7962
2033	173192	56271	44140	45488	9772	8087
2034	175857	57136	44820	46188	9922	8211
2035	178521	58002	45499	46888	10072	8336
2036	181185	58868	46178	47588	10223	8460
2037	183849	59733	46857	48287	10373	8584
2038	186514	60599	47536	48987	10523	8709
2039	189178	61464	48215	49687	10673	8833

2040	191842	62330	48894	50387	10824	8958
------	--------	-------	-------	-------	-------	------

Cenários de Aproveitamento Energético dos RSU do Consórcio

A Tabela 7 mostra a quantidade de CH₄ gerado no Cenário I e II no período de 2025 a 2040. A massa (t) e o volume (m³) estimados de CH₄ emitido no Cenário I (100% dos RSU aterrados) para o período corresponde a um total de 198.473 tCH₄ e 277.973.750 m³CH₄, no Cenário II (sem a fração de papel/papelão) os valores alcançados foram de 142.178 tCH₄ e de 199.128.727 m³CH₄. A diferença das massas e os volumes de CH₄ entre os dois cenários representam uma diferença de aproximadamente de 28,4%.

Na Tabela 8 são apresentados os resultados dos cálculos de potência e energia disponível para o período de 2025 a 2040, em função da vazão de CH₄. Pode-se observar ao comparar os dois cenários que há uma redução na energia quando se opta pelo Cenário II (28,4%), o que corresponde a exclusão da fração papel/papelão, contudo, deve-se observar que a reciclagem não é incompatível com outros usos ou destinos de RSU. Isto é, embora afete o dimensionamento de projetos de outros usos dos resíduos como a recuperação energética (geração de energia elétrica), ou mesmo a disposição final, a reciclagem não se constitui, necessariamente, em rota excludente.

Em muitos países, a gestão de resíduos mudou muito na última década, principalmente em relação as políticas públicas de minimização de resíduos e reciclagem/reutilização introduzidas para reduzir a quantidade de resíduos gerados e aterrados, além disso, a recuperação de gases de aterros sanitários se tornou mais comum como uma medida para reduzir as emissões de CH₄ (IPCC, 2006).

Tabela 7. Quantidade de CH₄ gerado no Cenário I e II no período de 2025 a 2040

Cenário I			Cenário II		
Ano	tCH ₄ Gerado	m³CH ₄ Gerado	Ano	tCH ₄ Gerado	m³CH ₄ Gerado
2025	9647	13511428	2025	6911	9679019
2026	10054	14080817	2026	7202	10086905
2027	10450	14635557	2027	7486	10484297
2028	10836	15176733	2028	7763	10871973
2029	11214	15705351	2029	8033	11250653
2030	11583	16222342	2030	8297	11621004
2031	11944	16728567	2031	8556	11983643

2032	12299	17224826	2032	8810	12339142
2033	12646	17711856	2033	9059	12688030
2034	12988	18190342	2034	9304	13030798
2035	13324	18660916	2035	9545	13367898
2036	13655	19124166	2036	9782	13699751
2037	13981	19580634	2037	10015	14026745
2038	14302	20030824	2038	10245	14349242
2039	14619	20475200	2039	10473	14667575
2040	14933	20914193	2040	10697	14982051

Tabela 8. Potência e energia disponíveis para os Cenários I e II

Cenário I			Cenário II		
Ano	Potência (MW)	Energia (MWh/dia)	Ano	Potência (MW)	Energia (MWh/dia)
2025	11,4	82,3	2025	8,2	59,0
2026	11,9	85,8	2026	8,5	61,5
2027	12,4	89,2	2027	8,9	63,9
2028	12,8	92,5	2028	9,2	66,2
2029	13,3	95,7	2029	9,5	68,5
2030	13,7	98,8	2030	9,8	70,8
2031	14,2	101,9	2031	10,1	73,0
2032	14,6	104,9	2032	10,4	75,2
2033	15,0	107,9	2033	10,7	77,3
2034	15,4	110,8	2034	11,0	79,4
2035	15,8	113,7	2035	11,3	81,4
2036	16,2	116,5	2036	11,6	83,5
2037	16,6	119,3	2037	11,9	85,5
2038	17,0	122,0	2038	12,1	87,4
2039	17,3	124,7	2039	12,4	89,4
2040	17,7	127,4	2040	12,7	91,3

Certamente estes dados corroboram com o que já é feito no Aterro Dois Arcos que é o possível aproveitamento do CH₄ para queima e produção de energia. Na própria Lei 12.305 que instituiu a Política Nacional de Resíduos Sólidos, menciona o aproveitamento energético como destinação final adequada. Entretanto, trouxe também a necessidade da reciclagem como destinação final e a coleta seletiva dentre seus instrumentos, especificando-a como a coleta de resíduos sólidos previamente separados de acordo com sua constituição e composição.

Segundo ABREMA (2024) 60,5% das cidades brasileiras possuem iniciativas de coleta seletiva, mas na prática, toda cadeia que vai deste a separação, acondicionamento, coleta, tratamento e destinação final destes materiais, ainda carece de uma maior cobertura territorial, com isso, muitos destes resíduos não são reaproveitados pelos catadores e pelas indústrias de reciclagem, sendo depositados junto a fração matéria orgânica putrescível que geralmente são os restos de alimentos em aterros sanitários. Em grande parte dos aterros sanitários, não existe nenhum tipo de coleta e/ou separação destes materiais o que representa uma perda em termos energéticos, visto que estes poderiam voltar para a cadeia produtiva, e uma perda de vida útil dos aterros, uma vez que estes materiais ocupam um grande volume físico nas células dos aterros.

Utilizando os índices de economia de energia elétrica citados na Tabela 4, e a Tabela 6 que mostra a composição gravimétrica mássica dos materiais recicláveis pode-se obter os potenciais teóricos de conservação de energia elétrica para o consórcio (Tabela 9).

Tabela 9. Potencial de energia elétrica conservada na reciclagem dos RSU do Consórcio

Potencial de Energia Elétrica Conservada (MWh/dia)				
Ano	Calderoni	Morris	EPA	Warnken ISE
2025	1062	870	2144	878
2026	1081	885	2182	894
2027	1099	901	2219	909
2028	1118	916	2257	924
2029	1137	931	2295	940
2030	1155	946	2332	955
2031	1174	962	2370	971
2032	1193	977	2407	986
2033	1211	992	2445	1001
2034	1230	1007	2483	1017
2035	1248	1023	2520	1032
2036	1267	1038	2558	1048
2037	1286	1053	2596	1063
2038	1304	1068	2633	1078
2039	1323	1084	2671	1094
2040	1342	1099	2708	1109

Diante dos valores obtidos, para os diferentes índices levados em consideração para cada autor, fica claro a diferença entre estes. Sendo assim, optou-se pelos valores obtidos pelos índices de Morris por se tratar dos mais “conservadores”, uma vez que estes números são valores teóricos, que, na prática, e por diferentes razões, como as perdas naturais no processo de coleta e seleção, e as variações sazonais das proporções destes materiais ao longo do ano e dos anos, podem sofrer variações. De qualquer modo, esses números indicam que não se deve afastar a alternativa da reciclagem. E, não por acaso, a despeito de outros fatores de natureza socioeconômica, o índice de reciclagem no Brasil já é bastante alto para os materiais em que o índice de conservação por peso do material é mais elevado, como por exemplo, as latas de alumínio (metal), e as embalagens PET (plásticos).

Na Figura 1, pode-se comparar a energia disponível no Cenário I, proveniente do modelo atual que corresponde ao aterro dos RSU sem qualquer tipo de reciclagem (1.694 MWh/dia), do Cenário II com a retirada da fração papel/papelão dos RSU do aterro (1.213 MWh/dia), do Cenário II proveniente exclusivamente da reciclagem (15.751 MWh/dia) e do Cenário II que envolve a soma das energias do CH₄ proveniente do aterro sanitário com a exclusão da fração papel/papelão com a da reciclagem (16.964 MWh/dia).

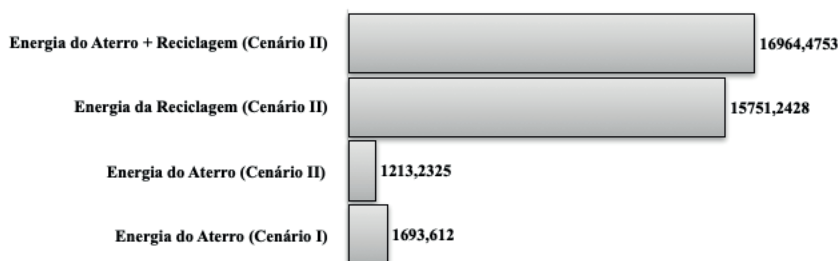


Figura 1. Comparação das energias disponíveis para os Cenário I e II em MWh/dia

Através da Figura 1, percebe-se através da comparação entre o Cenário I e II que representam somente a energia proveniente do biometano do aterro sanitário que os valores são muito menores em comparação a energia proveniente da reciclagem do Cenário II, mas que somada a energia do aterro e a energia da reciclagem (Cenário II) o valor se torna ainda mais expressivo.

Dados do EPE (2025) mostram que houve um aumento de 1,9% do consumo final de energia em 2024 em relação a 2023, tendo os setores de transportes e o industrial como os líderes no País em termos de consumo de energia, correspondendo aos valores de 33,2% e 31,7%, respectivamente. No caso da energia elétrica, verificou-se crescimento na oferta interna de 39,7 TWh (+5,5%) em relação a 2023, tendo um

crescimento de 1,2 Mtep no setor industrial, mostrando que uma parte da energia consumida para a produção de materiais e produtos recicláveis poderia ser conservada a partir da prática de reciclagem, aumentando a oferta interna de energia.

Já o consumo de energia em 2024 nos transportes apresentou aumento de 2,7% em relação a 2023. Segundo o EPE (2025) a oferta interna de gás natural aumentou de 30,2 (2023) para 31,0 Mtep (2024) e por outro lado, a participação de fontes renováveis na matriz energética brasileira chegou ao patamar de 50% de renovabilidade, entretanto, o biogás contribuiu somente com 0,5% desta energia. Estes dados mostram a necessidade e a oportunidade de implementação desta transição energética, que envolve economia circular e descarbonização da economia com o uso do biometano como substituto de combustíveis fósseis na matriz energética nacional. O biometano pode ser comercializado de diversas formas: como gás natural comprimido (GNC) ou gás natural liquefeito (GNL), podendo ser amplamente empregado nos setores doméstico, industrial e veicular.

Segundo a ABREMA (2024) atualmente o Brasil possui 1.365 plantas de produção de biogás, com 86% do volume de gás produzido sendo utilizado para geração de energia elétrica. Dessas plantas, cerca de 10% utilizam como substrato resíduos provenientes de saneamento (unidades em aterros sanitários e estações de tratamento de esgoto). Isso sugere um grande potencial de expansão do uso do RSU para geração de energias renováveis no país.

CONCLUSÕES

O estudo evidencia o grande potencial energético dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU) gerados pelos municípios do consórcio do Aterro Sanitário de Dois Arcos, especialmente quando se considera a reciclagem como parte integrante da estratégia de aproveitamento energético. A comparação entre os cenários analisados mostra que, embora o biogás proveniente da decomposição orgânica seja uma fonte importante de energia, a reciclagem de materiais como papel/papelão, plástico, metal e vidro apresenta um potencial ainda maior de conservação energética, contribuindo significativamente para a redução de emissões de gases de efeito estufa e para a sustentabilidade do sistema.

A implementação de políticas públicas que incentivem a coleta seletiva, a triagem e a reciclagem é essencial para transformar o modelo atual em um sistema mais eficiente, ambientalmente adequado e economicamente viável. Além disso, a valorização energética dos RSU por meio do biometano pode fortalecer a matriz energética nacional com fontes renováveis. Assim, a combinação entre reciclagem e recuperação energética se apresenta como caminho estratégico para promover a economia circular, aumentar a vida útil dos aterros e atender aos compromissos climáticos assumidos pelo país.

REFERÊNCIAS

Pereira Jr., A.O. Aproveitamento Energético de Resíduos: Um Mercado Que Não Se Pode Descartar. Boletim Regional, Urbano e Ambiental, v. 24, 2020.

ABREMA - Associação Brasileira de Resíduos e Meio Ambiente. Panorama dos Resíduos Sólidos no Brasil 2024. 84 p., 2024.

Brasil. Lei 12.305, de 02 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. 17p., 2010.

ONU - Organização das Nações Unidas. Os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. 2023. Nações Unidas Brasil. Disponível em: <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>. Acesso em: 30 jan. 2025.

EPE – Empresa de Pesquisa Energética. Avaliação Preliminar do Aproveitamento Energético dos Resíduos Sólidos Urbanos de Campo Grande, MS. Série Recursos Energéticos, Nota Técnica Den 06/08, 77 p., 2008.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Painel de Indicadores, 2025.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico, 2025.

Serenco - Serviços de Engenharia Consultiva. Elaboração de Estudos e Projetos Para Consecução dos Planos Municipais de Saneamento Básico, 2013.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, v. 5 - Waste, Chapter 3 - Solid Waste Disposal, 2006.

Calderoni, S. Os bilhões perdidos no lixo, 1a ed. São Paulo: Humanitas Editora, 1996.

EPA. U. S. Environmental Protection Agency. Waste Reduction Model. Washington, DC: EPA, 2007.

Morris, J. Recycling Versus Incineration: An Energy Conservation Analysis, Journal of Hazardous Materials, vol. 47, p. 277-293, 1996.

Warnken ISE. Potential for Greenhouse Gas Abatement from Waste Management and Resource Recovery Activities in Australia. Final Report, 54p. Sydney, NSW: Warnken ISE/SITA, 2007.

Monteiro, J.H.P. et al. Manual de Gerenciamento Integrado de Resíduos Sólidos. Rio de Janeiro: IBAM, 2001.

SISEMA - Sistema Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Caracterização gravimétrica dos resíduos sólidos urbanos do Estado de Minas Gerais. Vol. II, Belo Horizonte, 2017.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. Balanço Energético Nacional. Relatório Síntese 2025 – Ano Base 2024, 74 p., 2025.