

## PRODUÇÃO DE ENERGIA A PARTIR DE RESÍDUOS: OPORTUNIDADE PARA AUMENTAR A PENETRAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS E REDUZIR A PEGADA ECOLÓGICA NOS PEQUENOS ESTADOS EM DESENVOLVIMENTO

Herlander Mata-Lima<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ILATIT – Instituto Latino Americano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Universidade Federal da Integração Latino-Americana, Paraná – Brazil. Corresponding author: helima@ist.utl.pt

<sup>2</sup>IST – Energy Initiative, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisboa – Portugal. E-mail: helima@ist.utl.pt

### RESUMO

Os Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (SIDS) enfrentam desafios como a redução da parcela de energia fóssil e deposição de resíduos em aterros. Este trabalho resume os principais aspectos dos SIDS que restringem o desenvolvimento econômico, as fontes de energia e a estratégia de gestão de resíduos. Uma revisão bibliográfica integrativa é conduzida para sintetizar o estado da arte das estratégias de transformação de resíduos em energia (WtE) e comparar as tecnologias à luz de sua adequação aos SIDS. Os achados mostram que, considerando a grande quantidade de resíduos produzidos anualmente, as tecnologias WtE são de extrema importância para reduzir a pegada ecológica (EF), as emissões de gases de efeito estufa (GEE), e aumentar a participação de energias renováveis com instalação de usinas de incineração com recuperação de energia para substituir usinas de combustível fóssil. A estimativa da capacidade potencial de geração de energia (MWh) a partir de resíduos sólidos municipais anuais (MSW) em cada SIDS, bem como a área de terra reduzida necessária (para edifícios e paisagismo) demonstrou a viabilidade de usinas WtE.

**PALAVRAS-CHAVE:** Resíduos Sólidos Municipais, Waste-to-Energy, Incineração, Impactos ambientais; Sustentabilidade.

### INTRODUÇÃO

O consumo de energia primária e o crescimento demográfico estão entre os principais contribuintes para a emissão de gases de efeito estufa (GEE) (SONG et al., 2016) e deterioração dos serviços ecossistêmicos (RUGANI et al., 2009). De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE), a área urbana é responsável por 2/3 do consumo de energia primária, o que representa 71% dos GEE relacionados à energia direta (IEA, 2008). Por outro lado, a economia atual – comumente chamada de economia de carbono devido à dependência excessiva de fontes de energia não renováveis (XIE et al., 2014) – tem funcionado com mais de 56% da população mundial concentrada na área urbana como consequência do crescimento demográfico (com notável alta taxa de urbanização e industrialização) (UNITED NATIONS, 2017), essa participação tem uma média de 58,4% nos Pequenos Estados Insulares de Desenvolvimento (SIDS) e pode chegar a 100% em alguns deles (e.g., Ilhas Cayman e Singapura) (UNITED NATIONS, 2021). O padrão atual de desenvolvimento exerce impactos negativos sobre a taxa de consumo de energia (causando a redução da camada de ozônio devido às emissões resultantes do uso excessivo de combustível fóssil), produção de resíduos (e.g., o aumento de RSU está relacionado a padrões de vida mais elevados e aumento da população) e subsequente poluição do ar, solo e água (RUGANI et al., 2009).

O ritmo atual do crescimento demográfico (população + crescimento industrial com urbanização massiva) exerce grande pressão nos serviços ecossistêmicos e pegada ecológica (PE), sendo os efeitos mais exacerbados nos SIDS. Assim, os princípios do desenvolvimento sustentável estão a receber atenção especial na agenda internacional e, recentemente, seguindo os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) (UNITED NATIONS, 2010), a Organização das Nações Unidas (ONU) definiu dezessete (17) Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) a serem alcançados até 2030 (UNITED NATIONS, 2012, 2015). A eficiência energética, o esgotamento de recursos e as preocupações com o controle da poluição estão entre os 17 ODS, nomeadamente através dos objetivos n.º 7 (Garantir o acesso a energia acessível, confiável, sustentável e moderna para todos), n.º 12 (Assegurar padrões de consumo e produção sustentáveis) e n.º 13 (Tomar medidas urgentes para combater as mudanças climáticas e seus impactos). Tradicionalmente, os SIDS utilizam usinas termelétricas convencionais (baseadas em combustível fóssil importado) para produzir energia com elevados custos financeiros e ambientais (WOLF et al., 2016), uma vez que não possuem capital natural suficiente (e.g., condição hidrográfica para desenvolver energia hidrelétrica). A silga SIDS representa um grupo de pequenas economias em desenvolvimento que compartilham certas semelhanças em termos de sua localização remota e isolamento relativamente às economias desenvolvidas, densidade populacional, escassez de terras e desafios em vários setores que envolvem mudanças climáticas, meio ambiente, energia, economia, bem como forte dependência no mercado internacional (MOHEE et al., 2015)]. Os SIDS compreendem as seguintes três regiões geográficas principais: SIDS do Caribe, SIDS

do Pacífico e SIDS do Atlântico, Oceano Índico, Mediterrâneo e Sul da China (AIMS) (UNDESA, 2016). Esses países têm várias restrições socioeconômicas e ambientais e alta dependência das economias desenvolvidas, conforme destacado na seção 3 (Tabela 1). A mitigação do custo da energia e dos impactos ambientais em SIDS tem sido um grande desafio devido à escassez de recursos (fontes de energia e terra) (WOLF et al., 2016). Portanto, Waste-to-energy (WtE) pode ser uma alternativa para (1) aumentar a penetração de energia renovável, (2) reduzir o custo da energia e aumentar a confiabilidade, (3) reduzir a quantidade de descarte de resíduos e, assim, aumentar a vida útil de aterro e (4) reduzir as pegadas de carbono (PC) e a ecológica (PE) associadas ao crescimento demográfico. Além disso, há várias razões que tornam WtE vantajosa (econômica e ambientalmente) para SIDS visto possuírem uma produção média de resíduos per capita (~ 1,29 kg / capita / dia) semelhante àquela que se verifica nos países membros da Organização para Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE, ~ 1,35 kg / habitante / dia) (MOHEE et al., 2015) e custo acessível de coleta e transporte de resíduos para usinas de energia devido à alta densidade de assentamento urbano (Tabela 2) e, portanto, pequenas distâncias de viagem para usinas de energia e aterros. Como a quantidade de RSU sujeito a aterro em alguns países europeus (Alemanha, Holanda, Áustria, Bélgica, Suécia e Dinamarca) já é inferior a 5% (CUCCHIELLA et al., 2014), a tecnologia empregada deve ser utilizada para reduzir o custo de energia e mitigar os impactos ambientais em SIDS (e.g., o local do aterro nunca poderá ser usado para outros fins, de modo que novas áreas verdes devem ser convertidas em aterros que aumentam a pegada ecológica - PE). Vale ressaltar que a União Européia enfatizou, com a diretriz sobre eficiência energética (EUROPEAN PARLIAMENT, 2012), a necessidade de valorizar a produção de eletricidade a partir de indústrias de incineração de resíduos em escala regional e indica (*vide* EUROPEAN PARLIAMENT, 2018) que a partir de 2035 apenas 10% dos resíduos poderão ser descartados em aterros sanitários. SIDS devem se esforçar para atingir essa meta devido às suas peculiaridades (e.g., baixa disponibilidade de terra, alta densidade urbana e dependência de energia fóssil) que fomentam a relevância da estratégia de WtE. Como indicador útil, é importante ressaltar que, nos Estados Unidos, 123 litros de gasolina, 57 litros de diesel, 79 kg de outros produtos Fischer-Tropsch (FT) (e.g., diesel, gasolina, gás liquefeito de petróleo) e 193 kWh de eletricidade são produzidos a partir da conversão de uma tonelada de RSU por meio de métodos de gaseificação e FT (PRESSLEY et al., 2014).

O custo da energia em SIDS está entre os mais altos do mundo devido aos altos custos de transporte dos combustíveis, que contribuem para um preço mais alto por unidade de eletricidade em comparação com países não-ilhas (WOLF et al., 2016). Apesar do aumento da produção de resíduos devido ao crescimento demográfico, a maioria dos SIDS não possui infraestrutura adequada para coleta e tratamento de resíduos nem aterro adequado para disposição de resíduos com recuperação de biogás. Os resíduos ainda são despejados em aterros não controlados (MOHEE et al., 2015), o que significa que o lixiviado é liberado no solo e na água e que o biogás não é coletado para a produção de energia. Este trabalho foi realizado com o objetivo de investigar os principais aspectos das diferentes tecnologias WtE, bem como sua relevância para SIDS, os aspectos e impactos ambientais associados e indicadores (e.g., demográficos, fisiográficos e econômicos) que tornam as tecnologias WtE um ativo para SIDS como forma de mitigar a pegada de carbono e a pegada ecológica global, reduzindo a disposição de resíduos em aterros e eliminando o despejo ilegal e queima de quintal. O escopo deste trabalho é limitado aos SIDS – de acordo com suas condições geográficas, econômicas e sociodemográficas – mas também se aplica a microrregiões (pequenos municípios distantes de áreas metropolitanas) de grandes países.

## OBJETIVOS

O trabalho foi realizado com o objetivo de caracterizar o estado da arte em WtE, os aspectos e impactos ambientais das tecnologias de gestão de resíduos, os indicadores relevantes dos SIDS e os potenciais econômico e ambiental dos RSU visando fornecer aos tomadores de decisão local (SIDS) opções para uma gestão de resíduos sustentável, considerando o nexo de resíduo-energia e os objetivos de desenvolvimento sustentável 7 (ODS 7: Garantir o acesso a energia acessível, confiável, sustentável e moderna para todos) e 11 (ODS 11: Tornar as cidades inclusivas, seguras, resilientes e sustentáveis).

## METODOLOGIA

A metodologia adotada neste artigo pode ser dividida nas três etapas que se seguem. Primeiramente, realizou-se uma revisão da literatura para caracterizar (1) o perfil socioeconômico dos SIDS em termos de densidade populacional, população urbana e produto interno bruto (PIB) per capita, (2) produção de resíduos e (3) verificar a penetração de tecnologias WtE nesses países. Em segundo lugar, foram feitos esforços para estabelecer um conjunto de fatores relevantes – quantidade e composição dos resíduos, eficácia da reciclagem (depende da conscientização e envolvimento das partes interessadas) e teor de umidade do resíduo – que contribuem para a viabilidade das tecnologias WtE, bem como sua eficiência elétrica. Terceiro, a estratégia de gestão WtE foi descrita para destacar as vantagens e desvantagens correspondentes em relação aos aspectos técnicos, ambientais e socioeconômicos relacionados a cada tecnologia e como eles se restringem uns aos outros. Esta etapa também incluiu uma síntese dos aspectos e impactos ambientais das tecnologias WtE.

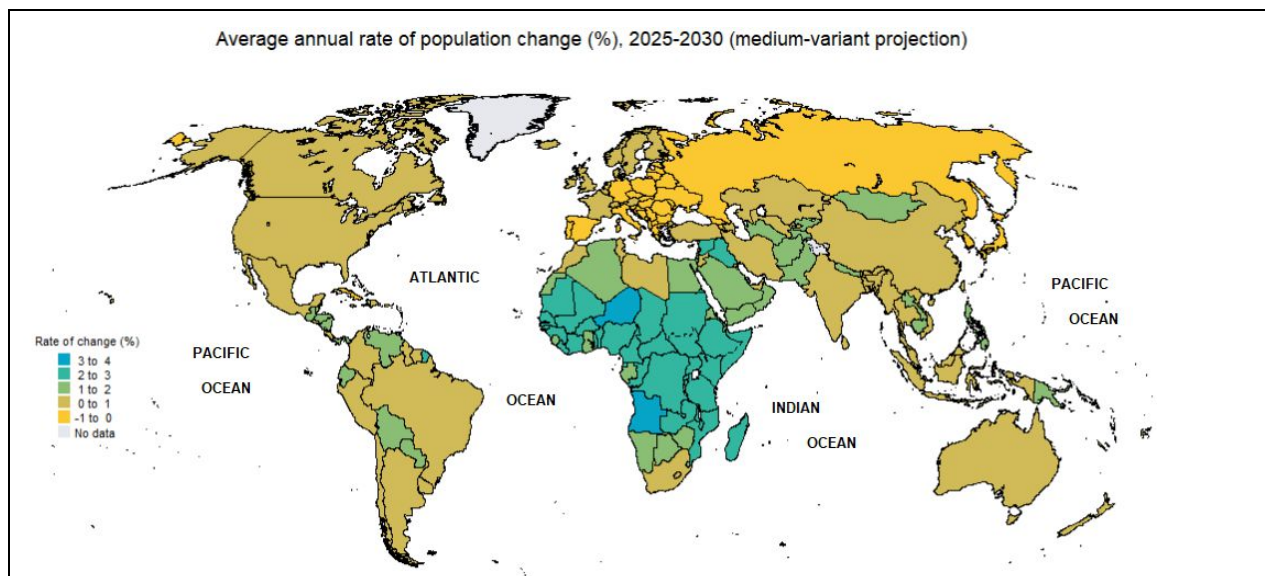
Para a estratégia de revisão de literatura, o primeiro passo foi pesquisar literatura contendo dados/informações relevantes sobre WtE. A pesquisa foi desagregada em três regiões: (1) estudos sobre o perfil socioeconômico dos SIDS, (2) estudos sobre resíduos e estratégia WtE nos SIDS e (3) estudos sobre WtE e impactos ambientais no cenário internacional. No entanto, artigos que discutem o uso de tecnologias WtE numa perspectiva ambiental e socioeconômica também foram incluídos. A pesquisa foi realizada inicialmente usando a string de pesquisa "waste-to-energy AND SIDS" nas principais bases de dados bibliográficas relevantes, como SCOPUS, Scencedirect e PubMed, para os anos de 1977 a 2021. Depois disso, uma pesquisa usando "waste-to- energy AND OECD OR Sustainability OR Environment", também foi realizada, considerado o mesmo período, para obter informações adicionais sobre a aplicação de WtE noutras regiões, bem como o contexto ambiental. Os resumos de artigos potencialmente relevantes foram examinados para determinar se eles incluíam informações úteis e, em seguida, os textos completos dos artigos selecionados foram baixados. Além disso, as listas de referência de artigos baixados foram examinadas para quaisquer estudos complementares, como aqueles que usam terminologia diferente. Esses procedimentos resultaram em 90 artigos que atenderam aos critérios de inclusão: relatar dados sobre a produção e gestão de resíduos em SIDS, tecnologias WtE, bem como seus impactos socioeconômicos e ambientais. A revisão incluiu todos os estudos que atenderam a esses critérios e não apenas uma amostra deles. A próxima etapa foi codificar as informações de cada estudo em um conjunto de tabelas, para que os resultados gerais pudessem ser tabulados e comparados.

### **Principais Características dos SIDS**

SIDS encontram-se espacialmente distribuídos, conforme mostra a Figura 1. SIDS exibem várias semelhanças, como isolamento de economias desenvolvidas, produto interno bruto (PIB) baseado principalmente no setor de turismo e serviços, situação que aumenta as preocupações ambientais devido ao crescimento demográfico (e.g., produção de resíduos, virtual de água) e outros obstáculos sintetizados na Tabela 1.

**Tabela 1. Obstáculos ao crescimento econômico e ao desenvolvimento de SIDS. Fonte: elaborada com base no Wolf et al., 2016, Hampton e Christensen, 2007, Scheyvens e Momsen, 2008, Noy, 2008 e Pratt, 2015.**

<b>Physical/Environmental factors</b>	<b>Socio-economic factors</b>
Tamanho pequeno (área de terra)	Pequena população
Insularidade (isolamento das economias desenvolvidas e, portanto, altos custos de transporte)	Pequena economia baseada essencialmente no turismo/serviços
Vulnerabilidade ambiental:	Alta proporção da população urbana, bem como densidade populacional
Recursos limitados (por exemplo, terra, água)	Altos níveis de dependência do comércio internacional devido à insularidade
Maior efeito das mudanças climáticas	Taxas de alfabetização mais baixas
Alta vulnerabilidade a desastres naturais	Governança insuficiente
Ecossistemas sensíveis	Renda <i>per capita</i> mais baixa
Redução significativa da produção após desastre.	Alta dependência de combustível fóssil para satisfazer a demanda de energia
	Importação de combustíveis tem participação de 12 a 37% do total dos produtos importados
	Alto desemprego
	Forte dependência da ajuda externa.



**Figura 1:** Mapa mundial com SIDS do Pacífico, Caribe e AIMS. O grupo de Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento (SIDS) é composto por países ou territórios do Caribe, Pacífico e Atlântico, Oceano Índico, Mediterrâneo e Sul da China (AIMS). Fonte: modificada de United Nations, DESA, Population Division, <https://population.un.org/wpp/Maps/>

A população de SIDS tem aumentado nas últimas décadas e a população total agora é de aproximadamente 70,7 milhões de habitantes, dos quais 41 milhões vivem na área urbana (*vide* Tabela 2). A alta densidade populacional em assentamentos urbanos (Tabela 2) e o crescimento do turismo induzem uma quantidade considerável de resíduos produzidos por indústrias (e.g., hotéis, restaurantes) e residências. No entanto, um reduzido número de SIDS usam uma pequena porcentagem de resíduos em instalações de recuperação de energia devido à falta de conscientização das partes interessadas (e.g., autoridades governamentais, população) e porque o aterro requer menos investimentos. A quantidade de RSU depositado em aterro ou descartado em lixões em SIDS é de cerca de 70 milhões de toneladas (Tabela 2), dos quais menos de 10% são tratados por incineração para produzir eletricidade (SHAH e NILES, 2016, SURROOP e RAGHOO, 2017). Cucchiella et al. (2014) destacou que o valor do mercado global de incineração de resíduos aumentou de 2008 a 2012 (+ \$1,3 bilhões de dólares) e continuará a crescer (+ \$6,8 bilhões de dólares de 2012 a 2022).

**Tabela 2.** Descrição dos principais indicadores socioeconômicos e produção de resíduos nos SIDS. Fonte: elaborada com base em <sup>a</sup> United Nations (2019) <sup>b</sup> Worlddata (2021) <sup>c</sup> UNITED NATIONS (2019), <sup>d</sup> United Nations (2019), World Bank (2019), <sup>e</sup> United Nations (2021), ( ) – os números entre parênteses referem-se ao ano em que os dados foram coletados. Legenda: nd – ausência de dados, na – não aplicável.

	País	População (milhares) <sup>a</sup>		Área (km <sup>2</sup> ) <sup>b</sup>	População urbana-UP (%) <sup>c</sup>	PIB <i>per capita</i> (US\$) <sup>d</sup>	RSU coletado (10 <sup>3</sup> toneladas) <sup>e</sup>
		2019	2030				
SIDS do CARIBE: população urbana - PU	Anguilla	15	16	91.0	100	25 529	15 (2008)
	Antigua and Barbuda	97	105	440.0	75	17 113	138 (2014)
	Aruba	106	110	180.0	44	29 008	nd
	Bahamas	389	427	13 880.0	83	28 608	240 (2005)
	Barbados	287	289	431.0	32	18 148	nd
	Belize	390	468	22 966.0	47	4 815	69 (2000)
	British Virgin Islands	30	32	153.0	49	34 246	37 (2005)
	Cayman Islands	65	73	259.0	100	91 393	nd
	Cuba	11 333	11 142	109 884.0	78	9 296	4 888 (2015)
	Dominica	72	73	750.0	71	5 952	21 (2005)
	Dominican Republic	10 739	11 770	48 442.0	83	8 282	nd
	Grenada	112	116	348.5	37	10 809	nd
	Guadeloupe	400	400	1 628.0	100	27 000	262 (2013)
	Guyana	783	822	214 969.0	28	6 609	111 (2011)
	Haiti	11 263	12 733	27 750.0	58	1 272	nd
Jamaica	2 948	3 048	10 991.0	57	5 582	1 464 (2006)	
Montserrat	5	5	102.0	10	13 487	nd	

	Puerto Rico	2 933	2 905	9 104.0	94	32 874	nd
	Saint Kitts and Nevis	53	56	261.0	31	19 935	nd
	Saint Lucia	183	189	617.0	19	11 611	72 (2015)
	Saint Vincent and the Grenadines	111	113	389.0	53	7 458	38 (2002)
	Suriname	581	632	163 820.0	19	6 491	205 (2015)
	Trinidad and Tobago	1 395	1 413	5 131.0	54	17 398	425 (2002)
	US Virgin Islands	105	101	346.4	97	37 233	nd
SIDS do PACÍFICO: PU (56.5%)	American Samoa	55	55	199.0	88	11 467	nd
	Cook Islands	18	18	236.7	77	21 603	nd
	Fiji	890	966	18 274.0	58	6 176	nd
	French Polynesia	279	297	4 167.0	62	14 324	125 (2013)
	Guam	167	181	549.0	96	35 712	nd
	Kiribati	118	139	811.0	56	1 655	nd
	Marshall Islands	59	65	181.3	79	3 788	26 (2007)
	Federated States of Micronesia	114	127	702.0	23	3 568	nd
	Nauru	11	11	21.0	100	9 397	nd
	New Caledonia	283	311	18 575	71	12 580	nd
	Niue	2	2	261.5	47	15 586	nd
	Northern Mariana Islands	57	61	477.0	91	23 257	nd
	Palau	18	18	459.0	81	14 902	nd
	Papua New Guinea	8 776	10 709	462 840.0	13	2 829	nd
	Samoa	197	220	2 842.0	18	4 324	5 (2015)
	Solomon Islands	670	865	28 400.0	25	2 374	nd
	Timor-Leste	1 293	1 574	15 007.0	31	1 560	nd
	Tonga	104	116	748.5	24	4 903	nd
Tuvalu	12	13	26.0	64	4 059	nd	
Vanuatu	300	383	12 189.0	26	3 116	nd	
AIMS: PU (60.6%)	Bahrain	1 641	2 013	765.3	90	23 504	nd
	Cape Verde (Cabo Verde)	550	610	4 033.0	67	3 604	146 (2015)
	Comoros	851	1 063	1 862.0	30	1 370	nd
	Guinea-Bissau	1 921	2 461	36 125.0	44	697	nd
	Maldives	531	519	300.0	41	10 626	325 (2014)
	Mauritius	1 270	1 274	2 040.0	41	11 099	486 (2015)
	São Tomé and Príncipe	215	268	1 001.0	74	1 947	nd
	Seychelles	98	103	458.4	58	17 748	nd
	Singapore	5 804	6 262	728.6	100	65 233	7 668 (2015)
Total/Média		70699	74694	Na	58.4	15 154	nd

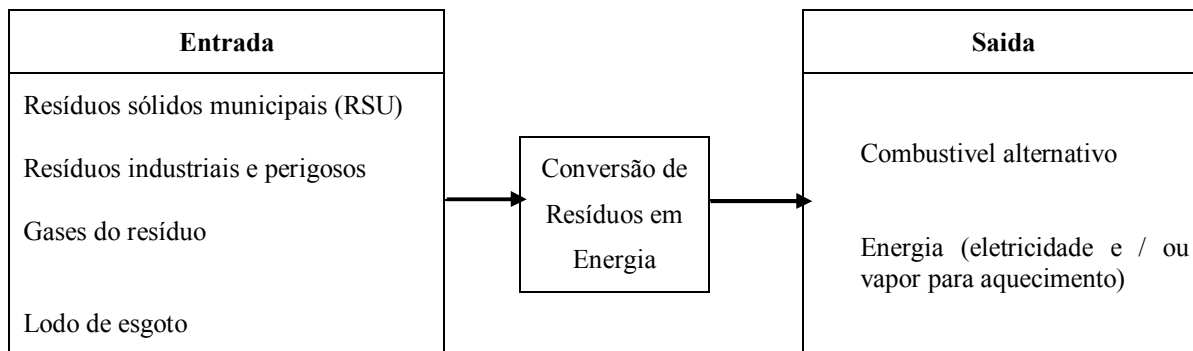
A situação dos SIDS é complexa e exige atenção especial no contexto da mudança global de forma que, em 2012, a Assembleia Geral das Nações Unidas designou 2014 como o 'Ano Internacional dos Pequenos Estados Insulares em Desenvolvimento' para aumentar a conscientização sobre as medidas de adaptação necessárias para resiliência econômica, social e ambiental dos SIDS.

## RESULTADOS

### Princípios da Estratégia de Gestão de Resíduos em SIDS

Conforme afirma a Comissão Europeia, a prevenção da produção de resíduos deve estar em primeiro lugar (EUROPEAN PARLIAMENT, 2008). De acordo com a estratégia europeia, que também é recomendada para SIDS e outras regiões, a seguinte prioridade deve ser definida: (1) prevenção/redução da produção de resíduos, (2) reutilização para o mesmo ou outro fim, (3) reciclagem, (4) recuperação de energia e (5) eliminação (aterro). A Tabela 4 apresenta a descrição e a relevância de cada nível dessa hierarquia para SIDS (consulte Zhang et al., 2021 para se aprofundar nas considerações gerais sobre a hierarquia). Deve-se dar preferência à recuperação de energia em detrimento do aterro porque a matéria orgânica (MO) (ou seja, resíduos biologicamente degradáveis) deve ser submetida a processos biológicos (e.g., digestão anaeróbica para produzir, por exemplo, biogás para energia) e resíduos combustíveis - com matéria não biodegradável e baixo teor de umidade - pode passar por processamento térmico. Devido a semelhanças óbvias (e.g., alta densidade populacional e urbanização, domínio do terceiro setor – serviço), o exemplo de Manhattan (PSOMOPOULOS et al., 2009) pode ser usado para fins de *benchmarking* para desenvolver o programa de reutilização, reciclagem e WtE de

resíduos, em substituição da prática de aterro, em SIDS. Além disso, a sensibilidade ambiental dos SIDS e sua dependência econômica do turismo são fatores que tornam a Avaliação de Impacto Ambiental (EIA) de infraestruturas de RSU extremamente relevantes para definir a viabilidade e confiabilidade das indústrias de WtE. Com este propósito, a Comissão Europeia emitiu uma diretiva sobre prevenção e controle integrados da poluição (EUROPEAN PARLIAMENT, 2008) que pode ser adaptada à realidade dos SIDS. RSU e águas residuais domésticas são adequados para a indústria WtE (Figura 2) e geralmente compreendem as seguintes tecnologias: produção de energia para incineração de resíduos; produção de energia de biogás de resíduos alimentares; biodiesel derivado de óleo residual; produção de energia de biogás de águas residuais orgânicas e produção de energia com biogás de esterco de gado.



**Figura 2: Entrada (resíduos) vs saída (combustível e energia) da indústria WtE.**

Os RSU geralmente incluem fração de papel, plástico, borracha, tecidos, resíduos alimentares, madeira e aparas de quintal, algodão e couro (Tabela 4).

**Tabela 4. Composição de RSU em SIDS. Fonte: elaborada com base no Mohee et al., 2015**

Tipo de resíduo	Amplitude de variação - SIDS (%)	Proporção média - SIDS (%)
Orgânico	41 – 48	44
Papel	11 – 17	16
Plástico	12 – 14	13
Metal	7 – 10	8
Vidro	2 – 7	6
Outros	12 – 20	13

Nota: O RSU varia de 0,82 kg/habitante/dia no Pacífico a 1,61 kg/habitante/dia nos SIDS do Caribe..

A predominância da fração orgânica (44%) e recicláveis (43%: papel, plástico, metais e vidro) nos RSU dos SIDS (Tabela 4) sugere que, dentre as técnicas disponíveis (e.g., reciclagem, compostagem, digestão anaeróbia, processos termoquímicos e aterro - vide Tabela 5), compostagem e digestão anaeróbica podem ser aplicadas para gerenciar os orgânicos e recicláveis podem ser usados para produzir energia (WtE) e também novos produtos por meio da reciclagem. No entanto, a reciclagem requer maturidade das partes interessadas (disposição para realizar uma separação adequada em casa) em relação à cadeia de gerenciamento de resíduos, uma vez que envolve a separação, coleta e preparação de materiais para permitir a conversão em outro material. Como o turismo é de extrema importância para a economia dos SIDS [26], esforços especiais devem ser feitos, em termos de governança ambiental, para encorajar as partes interessadas relevantes (e.g., hotel e outras instalações/serviços relacionados ao turismo) a implementar sistemas de gestão ambiental de acordo com para a família de padrões ISO 14000 como forma de reforçar a prevenção, reutilização e reciclagem de resíduos (depende da separação de resíduos na origem). É imperativo aumentar a participação das fontes renováveis no consumo final bruto de energia em SIDS, que atualmente é dominado por combustíveis fósseis (WOLF et al., 2016, SURROOP e RAGHOO, 2017). Tomando SIDS africano/do oceano Índico como exemplo, é possível compreender que a situação é de grande preocupação na maioria dos países (Tabela 3), uma vez que o combustível fóssil é a principal fonte de energia.

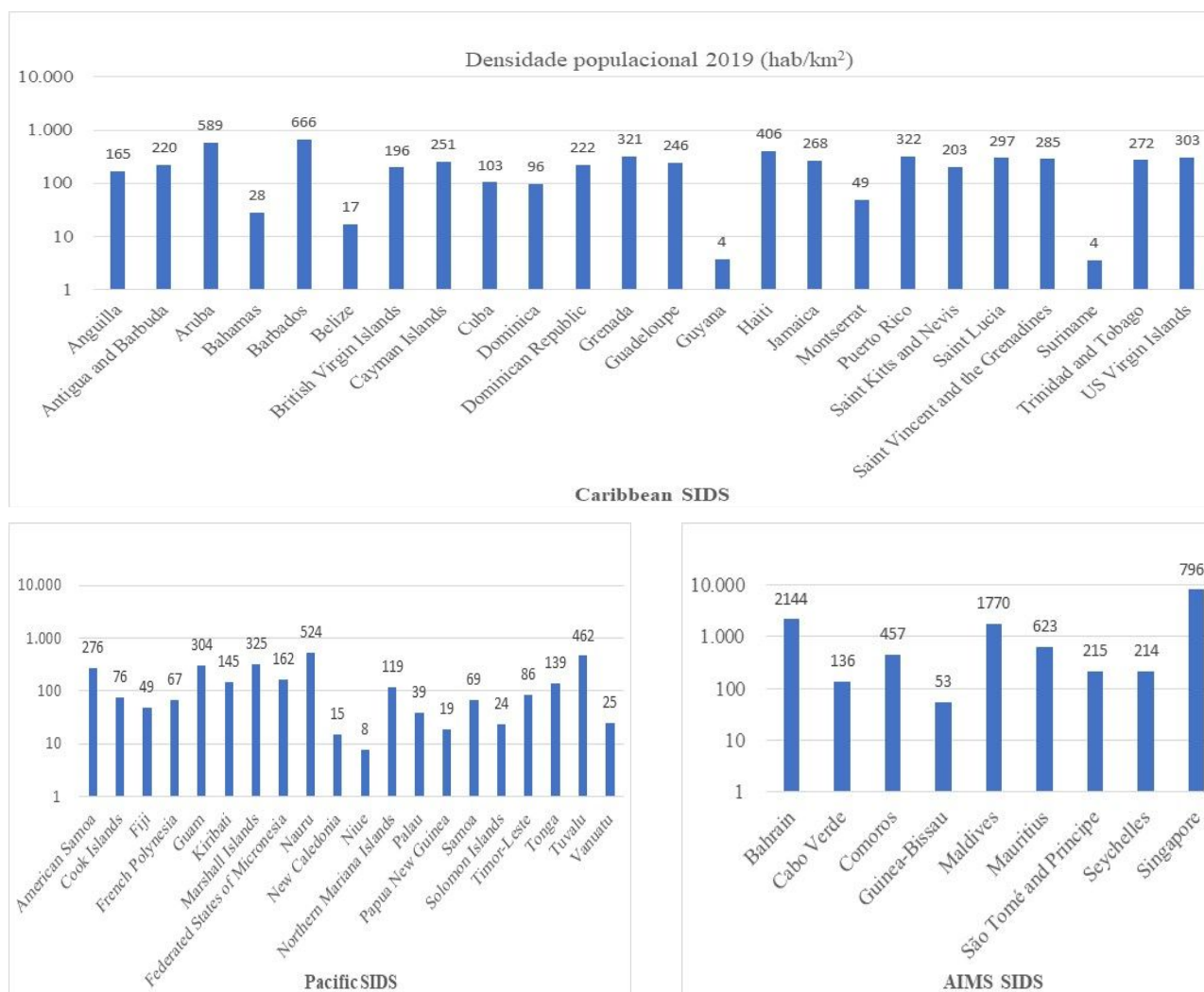
**Tabela 3. Principais fontes de energia em SIDS do oceano africano/índico. Fonte: elaborada de acordo com os dados da International Energy Agency (IEA) tratados por Wolf et al., 2016.**

Proporção de energia (%)	Países						
	Comoros	Cabo Verde	Mauritius	Guinea-Bissau	Maldives	São Tomé & Príncipe	Seychelles
Fossil fuel	34	35	72	100	100	74	100

A adoção de tecnologias WtE é uma oportunidade para aumentar a proporção de energia renovável em SIDS e a tomada de decisão deve considerar soluções econômicas (e.g., incineração, digestão anaeróbia de resíduos orgânicos) que satisfaçam as questões ambientais apresentadas na Tabela 6.

### Perspectiva das Tecnologias WtE

Os SIDS estão a experimentar um crescimento do turismo (o único meio de desenvolvimento econômico em vários SIDS), uma urbanização massiva (Tabela 2 e Figura 2), e enfrentando dificuldades com relação à gestão de resíduos sólidos urbanos (RSU, compreende resíduos domésticos e comerciais). Portanto, WtE pode desempenhar um papel importante, reduzindo a disposição de resíduos e aumentando a segurança energética urbana, uma vez que é projetado para o processamento (tratamento) de resíduos e para a produção de energia e combustível alternativo.



**Figura 2: Densidade populacional (habitantes/km<sup>2</sup>) de SIDS em 2019. Fonte: elaborada própria com base na Tabela 2.**

Apesar da contribuição de WtE para reduzir a emissão de gases de efeito estufa e PE, tais soluções ainda têm algumas preocupações ambientais e as emissões normalmente incluem concentrações muito baixas (quando comparadas aos

padrões da União Europeia e USEPA) de óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), óxidos de enxofre (SO<sub>x</sub>), monóxido de carbono (CO), material particulado (PM), metais pesados (principalmente Hg), carbono orgânico total (TOC) e dioxinas [9, 19, 38]. Porém, o aterro produz emissões mais altas [39]. Portanto, a estratégia para SIDS deve considerar a redução do aterro e, ao mesmo tempo, aumentar a reciclagem, a compostagem, o processo biológico e o processo termoquímico (vide descrição na Tabela 5). Este trabalho não considera a via físico-química, como a transesterificação, na qual resíduos orgânicos são convertidos em energia pelo uso de agentes químicos [45].





**Tabela 5. Breve descrição das tecnologias de gestão de resíduos em relação à recuperação de energia**

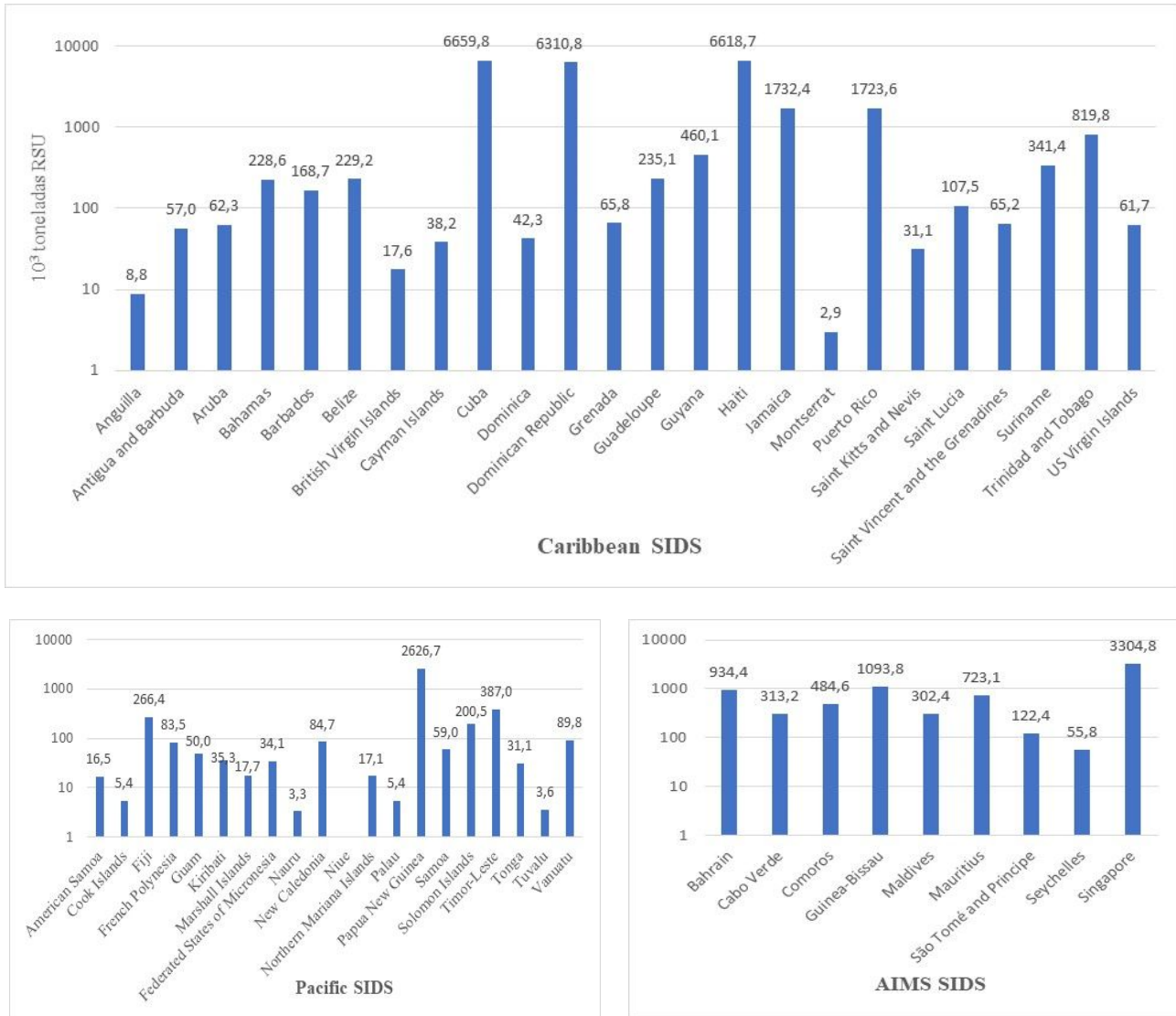
Tecnologia de gerenciamento de resíduos (TGR)	Breve descrição	Aplicação na produção de energia	Referência
Aterro	Representa a eliminação final de resíduos e é a opção menos desejada. A deposição em aterro é economicamente relativamente barata em comparação com outras tecnologias de gestão de resíduos, mas é ambientalmente cara para SIDS devido à escassez de terras e à alta produção de RSU, particularmente quando a indústria do turismo é relevante. Essa técnica é de grande preocupação porque não leva em consideração a vida útil completa dos materiais recicláveis. No entanto, esta é a principal tecnologia de gerenciamento de resíduos adotada mundialmente e em SIDS, onde a maioria deles não é sanitária (ou seja, despejo descontrolado de resíduos sem gerenciamento de lixiviado e coleta de gás). O alto nível de umidade, bem como a proporção de matéria orgânica no RSU dos SIDS (Tabela 4), aceleram o processo de produção de gases de aterro, de forma que o aterro existente pode ser facilmente adaptado (com baixo custo) para capturar biogás para produzir eletricidade.	Pode incluir a produção de eletricidade do biogás do aterro, mas não merece prioridade em SIDS ou em outro lugar (ver Tabela 3 - impactos ambientais da TGR).	Mohee et al., 2015, Fazeli et al., 2026, Surroop e Raghoo, 2017, Anshassi et al., 2021.
Reciclagem	O processo de separação, coleta e preparação de resíduos para serem reprocessados ou remanufaturados em outro material. Esta opção estende o ciclo de vida dos materiais, transformando resíduos em produtos valiosos (com consumo reduzido de energia e água, bem como menos poluição do ar) ou fornece insumos para tecnologias WtE, mas a reciclagem bem-sucedida depende das partes interessadas (e.g., comunidade, tomador de decisões) educação e engajamento para garantir a qualidade da separação, bem como os custos de coleta e transporte para a unidade de processamento. A reciclagem de alto valor agregado é a chave para uma economia circular.	Os recicláveis são usados para fomentar a produção de energia por meio de processos termoquímicos, de modo que a reciclagem é importante devido ao extenso pré-processamento (para eliminar materiais de baixa caloria) que é necessário para aumentar a eficiência dos processos termoquímicos.	Mohee et al., 2015, AlQattan et al., 2018.
Compostagem	Corresponde à degradação biológica de resíduos orgânicos na presença de oxigênio para produzir um composto que pode ser usado com segurança como condicionador de solo (fertilizante). Essa tecnologia é altamente relevante para o manejo da fração orgânica (substâncias biologicamente decomponíveis) que representam alta proporção de RSU em SIDS (Tabela 4). Quanto à localização, áreas densamente povoadas devem ser evitadas, pois o impacto do odor pode atingir até 200 m. Aproximadamente 20 - 25% da quantidade inicial requer descarte em aterro.	Não aplicável	Valério, 2010, Tabasová et al., 2012, Mohee et al., 2015, Xin-Gang et al., 2015.

<p>Processo biológico (PB)</p> <p>Digestão Anaeróbia, Fermentação</p>	<p>O PB pode ser aeróbico ou anaeróbico. O mais comum é a digestão anaeróbia (DA), que significa decomposição biológica de materiais orgânicos na ausência de oxigênio para produzir biogás (CH<sub>4</sub> ~70% e CO<sub>2</sub> ~30%) e um composto ‘digerido’ de alto valor nutritivo. Essa tecnologia de gerenciamento de resíduos é recomendável para SIDS, pois a fração orgânica do RSU chega a 44%. DA tem sido responsável por várias usinas de biogás em SIDS desde 1940. O biogás é produzido através da aplicação de DA para tratar resíduos agrícolas, águas residuais domésticas e estrume animal. Em relação aos processos de fermentação, tanto o bio-hidrogênio quanto o bioetanol ainda não são comumente usados para produzir energia em SIDS, sendo que este último está mais presente. É importante ressaltar que os processos de fermentação ainda não são aplicados ao RSU, mas sim à cana-de-açúcar, melão, coco, etc. fração seca, ou ainda aterro de resíduo estabilizado.</p>	<p>O PB é utilizado com os seguintes objetivos principais: minimização de massas e volumes depositados em aterro, secagem de frações de alto poder calorífico para uso como combustível, coleta do biogás produzido para a produção de eletricidade e/ou calor.</p>	<p>Valério, 2010, Mohee et al., 2015, AlQattan et al., 2018.</p>
---	--	---	--



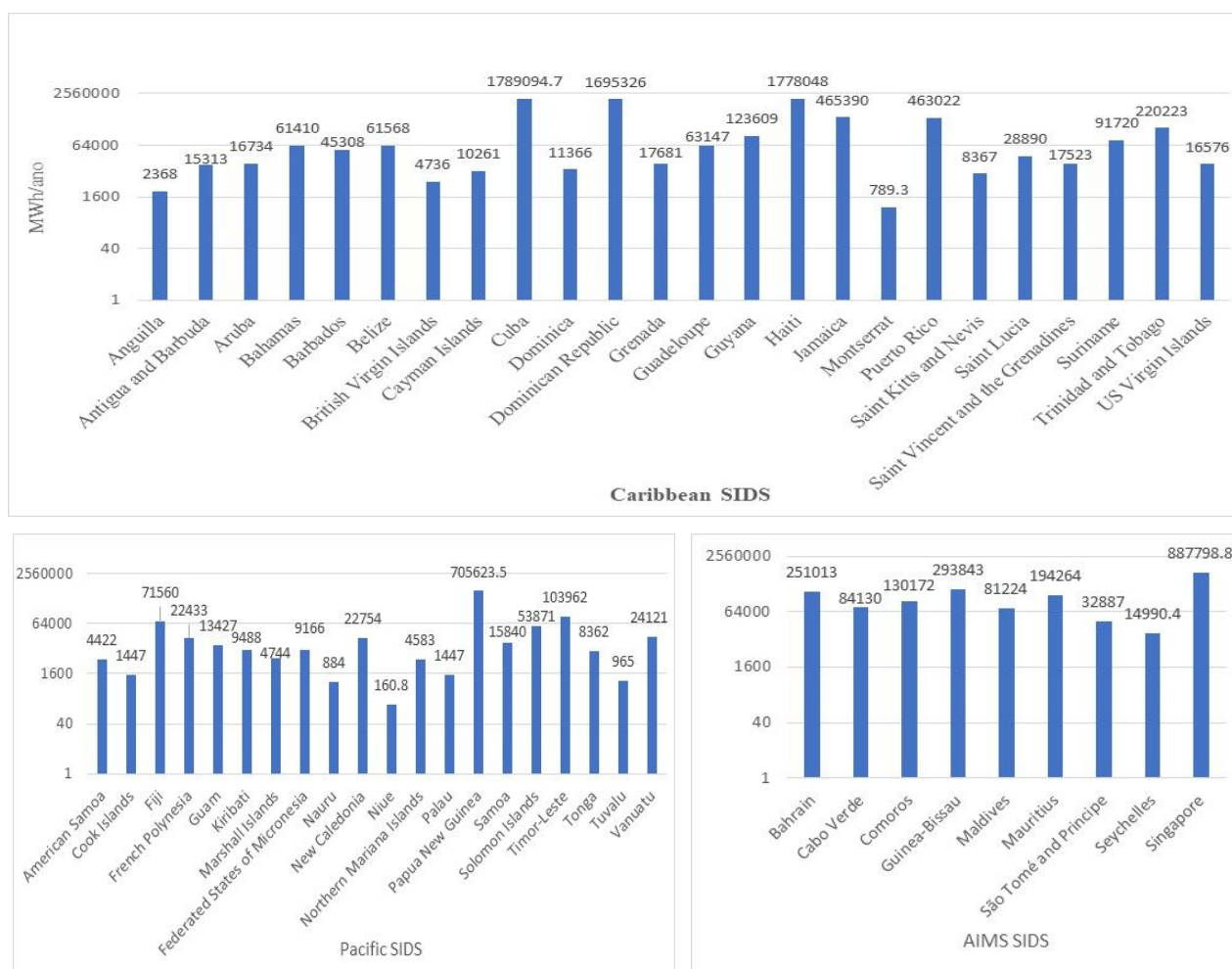
<p>Processos termoquímicos</p> <p>Incineração</p> <p>Gaseificação</p> <p>Pirólise</p>	<p>O processo reduz o volume de resíduos (reduz seu volume inicial em 90% e seu peso em 75% ao incinerar [42] e utiliza a energia quimicamente limitada nos resíduos (ou seja, calor e/ou energia elétrica e combustíveis alternativos são produzidos por meio de processamento térmico), além de promover a destruição de materiais perigosos que podem representar um risco significativo para o meio ambiente e a saúde pública. Entre os processos termoquímicos, a incineração (ou combustão) é o mais popular em SIDS e representa a degradação e decomposição térmica de materiais residuais ou biomassas na presença de oxigênio para produzir CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O e calor a uma temperatura de 800 - 1000 °C. A incineração com recuperação de energia pode ser considerada uma forma de evitar custos associados às tecnologias convencionais (e.g., queima de combustível fóssil). Em relação à categoria de resíduos, é importante destacar que os resíduos hospitalares são mais apropriados que os domésticos, pois o alto teor de umidade deste último leva a um baixo rendimento energético. Singapura é onde a incineração é mais significativa, com 41% dos resíduos incinerados para produzir o calor necessário que contribui com 2 a 3% da necessidade total de eletricidade do país. A incineração com recuperação de energia também é a mais comum nos Estados-Membros europeus - UE28 (EUROSTAT, 2019). Porém, essa tecnologia traz preocupações ambientais, como emissão de poluentes nocivos e produção de cinzas que geralmente são descartadas em aterros sanitários. Seria interessante explorar o potencial do uso de cinzas provenientes da incineração na indústria da construção (SILVA et al., 2018, KALBE e SIMON, 2020). Em Luxemburgo, a produção de cinzas residuais excede a capacidade de tratamento em 31% (BRUNO et al., 2021). A gaseificação é a combustão parcial de biomassa (e.g., resíduos agrícolas e florestais e excedente de coco) a cerca de 800-1000 °C para formar uma mistura de gás combustível. Os resíduos são convertidos em um produto que é gaseificado para a produção de vapor e eletricidade. Essa tecnologia pode contribuir para mitigar problemas decorrentes da falta de capacidade de arcar com o aterro, bem como as emissões de poluentes nocivos da incineração. Aracil et al. (2018) descobriram que a gaseificação produz emissões de GEE menores do que a incineração, e que a gaseificação com um gaseificador de leito fluidizado (FBG) com motor de combustão interna (ICE) é mais lucrativa devido à maior eficiência elétrica, mas recomendou um gaseificador de leito fluidizado (FBG) com ciclo orgânico de Rankine (ORC) por ser a melhor opção no curto prazo para países dominados por aterros sanitários. devido à sua maior confiabilidade técnica. A pirólise é a decomposição de materiais orgânicos na ausência de oxigênio em torno de 400 - 1000 °C resultando em produtos líquidos (bio-óleo), gasosos e sólidos (carvão vegetal). Essa tecnologia é menos usada em SIDS, mas tem sido aplicada em casca de arroz, madeira (para produzir carvão) e pneus inservíveis.</p>	<p>É preferível que o RSU seja composto por matéria não biodegradável e baixo teor de umidade. É relatado que resíduos hospitalares, pneus, óleo usado, biomassa, resíduos agrícolas e madeira têm sido usados para produzir energia por meio de processos termoquímicos em SIDS. Entre os fatores que contribuem positivamente para o desempenho do WtE estão a composição do lixo (baixo teor de matéria orgânica), a eficácia da reciclagem (depende do engajamento das partes interessadas) e o baixo teor de umidade do resíduo. Porém, a demanda de pré-processamento pode ser muito baixa às custas de alguma diminuição da eficiência.</p> <p>Há um conhecimento consolidado sobre a incineração, uma vez que é o método de disposição proeminente na Europa Ocidental, Japão e Coréia do Sul. Existem estudos relatando a eficiência das usinas WtE de 21,7 a 30% (MURER et al., 2011), 12,1 a 21,6% (CEWEP, 2010), e a faixa de produção de energia de 0,3 a 0,7 MWh/tonelada de RSU, respectivamente para calor e energia combinados e para usinas de recuperação de eletricidade (TABASOVÁ et al., 2010).</p>	<p>CEWEP, 2010, Murer et al., 2011, Mohee et al., 2015, AlQattan et al., 2018, Aracil et al., 2018, Maria et al., 2018, Silva et al., 2018, Eurostat, 2019, Siddiqi et al., 2020, Bruno et al., 2021.</p>
---	---	---	---

Valerio (2010) observou que para o material da fração limpo e separado da fonte do poço, a reciclagem levou a impactos ambientais menores do que a incineração. Contudo, quando os processos termoquímicos (e.g., incineração com recuperação de energia) são considerados para produzir eletricidade em substituição de usinas de combustível fóssil (carvão e petróleo), os benefícios ambientais e econômicos são significativos, pois os SIDS exibem uma produção média de RSU per capita tão alta quanto países desenvolvidos da OCDE (Figura 3).



**Figura 3:** Estimativa da produção de RSU (10<sup>3</sup> toneladas) em SIDS com base na produção média *per capita* (1,61, 0,82 e 1,56 kg/per capita/dia, respectivamente no Caribe, Pacífico e AIMS SIDS (MOHEE et al., 2015)) e população de 2019 exibida na tabela 2. Fonte: elaborada com base nos dados de Mohee et al., 2015 e Tabela 2.

Os resultados representados na Figura 3 mostram que os SIDS produzem RSU suficiente para justificar a instalação de usinas WtE pequenas (32 - 227 toneladas/dia) ou grandes (> 227 toneladas/dia), dependendo do país considerado, para evitar os impactos ambientais de aterros sanitários (*vide* Tabela 6) e usinas de combustível fóssil. Tomando o país com menor produção de RSU entre os SIDS (Tuvalu com 3.600.000 toneladas/ano, Tabela 2) e considerando que 30 milhões de toneladas requerem 3.000.000 m<sup>2</sup> de área de terra para aterro (Tabela 7), Tuvalu exigiria 41,5% (10.800.000 m<sup>2</sup>) da sua área total (26 km<sup>2</sup>) para eliminar 30 anos de resíduos. Se, por outro lado, os SIDS decidirem incinerar 50% de RSU em usina de incineração com recuperação de energia é possível produzir uma capacidade energética significativa (Figura 4), considerando que as usinas de incineração modernas produzem 537,28 kWh de eletricidade para cada 1 tonelada métrica de RSU em Portugal (CEWEP, 2018). Psomopoulos et al. (2009) relataram um valor semelhante para os EUA, 600 kWh/tonelada de RSU.



**Figura 4: Capacidade estimada de geração de energia (MWh/ano) para incineração de 50% do total de resíduos produzidos anualmente nos SIDS. Fonte: autores com base nos dados das Figuras 3 e CEWEP (2018).**

Os resultados apresentados na Figura 4, em relação ao uso de 50% de RSU para produção de eletricidade via incineração com recuperação de energia, indicam que as tecnologias WtE podem desempenhar um papel importante como fonte de energia renovável para reduzir a proporção de não renováveis (por exemplo, óleo combustível, carvão) na mistura de eletricidade em SIDS. Por exemplo, Maurício (AIMS SIDS) consome anualmente quase 2.800 GWh de eletricidade com a energia fóssil representando uma parcela de 72% na produção de eletricidade (Surroop e Raghoo, 2017, Khoodaruth et al., 2016), mas pode produzir 194,3 GWh a partir de 50% do RSU, conforme estimado com base em dados de 2019 (Tabela 2, Figura 4). Nos SIDS caribenhos, Belize é o único país onde a energia renovável (ER) predomina na matriz elétrica com uma participação de 65% (em 2012) e uma meta de 89% até 2033 (SHAH e NILES, 2016). Alguns países estabeleceram em 2012 uma meta ambiciosa de 100% (Dominica, Grenada, Montserrat), 90% (Guiana), 46% (Haiti) a ser alcançada antes de 2030 (SHAH e NILES, 2016), representando uma mudança dramática que varia de 31,5 (para o Haiti) para 100% (para Montserrat) de participação no mix de eletricidade.

**Tabela 6.** Principais aspectos e impactos ambientais da geração de energia (processo termoquímico). Fonte: elaborada com base no Psmopoulos et al., 2009, Cucchiella et al., 2014, AlQattan et al., 2018, Tabasová et al., 2010, Bruno et al., 2021, Sewak et al., 2021, Aryampa et al., 2021.

Aspectos ambientais						Impactos ambientais							
Emissão para atmosfera	Descarga na água	Descarga no solo	Ruído	Produção de cinzas (pode ser usada no setor da construção ou descartada em aterro)n	Consumo de recursos (ocupação de terra)	Aquecimento global (e.g., CO <sub>2</sub> enCH <sub>4</sub> )	Degradação do ecossistema	Toxicidade humana	Pegada ecológica	Precipitação ácida	Eutroficação da água	Aumento da temperatura do curso de água	Criação de emprego (incluindo qualificado)qualified
↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↓	↑	↑

Entre os aspectos (AA) e impactos ambientais (IA) incluídos na Tabela 6, a produção de foto-oxidantes (que aceleram a degradação de contaminantes orgânicos nas águas superficiais) e a criação de empregos são aumentados (↑) pelas tecnologias WtE e são considerados positivos. Os demais AA e IA são mitigados (↓) com a adoção de WtE, exceto o aumento de temperatura dos corpos d'água receptores que não ocorre no caso de aterro.

Tendo em vista que o aterro é o principal destino dos RSU nos SIDS e que a reciclagem é escassa (e.g., por falta de educação e sensibilização das partes interessadas e baixa quantidade de recicláveis que restringe a economia de escala), a produção de energia a partir de o biogás (metano – CH<sub>4</sub> e dióxido de carbono – CO<sub>2</sub>) pode ser atribuída ao aterro sanitário. Além disso, a digestão anaeróbia (DA) também é uma alternativa para a produção de energia de RSU e lodo de estações de tratamento de esgoto.

Considerando as tecnologias existentes (Tabela 5), é importante ressaltar que a tecnologia mais adequada a ser adotada em cada situação depende da composição do resíduo (MUNSTER e MEIBORN, 2010, TABASOVÁ et al., 2012). Todas as tecnologias WtE (Tabela 5) apresentam vantagens e desvantagens de acordo com as características do RSU (quantidade e composição), conscientização da comunidade (que influencia a reciclagem) e qualificação dos recursos humanos locais para lidar com a complexidade dos processos. Mesmo assim, o WtE pode reduzir a dependência dos SIDS da importação de derivados de petróleo usados nas termelétricas convencionais (petróleo e carvão).

Portanto, as duas tecnologias WtE amplamente adotadas são (TABASOVÁ et al., 2012, CURRY e PILLAY, 2012, TAN et al., 2014, SONG et al., 2016): (1) tecnologias relacionadas à produção de energia do biogás com base em processos biológicos que ocorrem por fermentação e, principalmente, digestão anaeróbia (neste processo, os microrganismos quebram o material orgânico biodegradável na ausência de oxigênio enquanto o biogás é produzido para fins energéticos); (2) produção de energia de incineração de resíduos que é apropriada para RSU combustível com matéria não biodegradável e baixo teor de umidade (neste processo, a matéria orgânica dos resíduos reage com o excesso de oxigênio em um processo de combustão em um forno, a partir do qual o calor produzido pode ser utilizado para produção de energia). Existem outras tecnologias WtE, como recuperação de gás de aterro, gaseificação, pirólise e hidrólise que são utilizadas em países desenvolvidos, em menor escala (TABASOVÁ et al., 2012, SONG et al., 2016, SIDDIQI et al., 2020).As duas tecnologias WtE amplamente utilizadas (processos biológicos e termoquímicos) têm algumas desvantagens no contexto de SIDS (e.g., os resíduos devem ser separados corretamente na origem, mas esta não é ainda uma prática em SIDS), o que pode ser um prejuízo real nos países em desenvolvimento, particularmente naquele com menor nível de capital social (ou seja, a capacidade das organizações e dos indivíduos de se organizarem em redes para viabilizar os objetivos coletivos).

#### DESAFIOS E BARREIRAS PARA A GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RESÍDUOS EM SIDS

O aumento da produção de resíduos como consequência do aumento do produto interno bruto (PIB), o aumento do índice de desenvolvimento humano (IDH), o crescimento da população (e turismo), a área de terra limitada para permitir uma taxa de produção de resíduos como a dos países altamente desenvolvidos da OCDE, a menos que o aterro seja significativamente reduzidas (e.g., uma meta de 10% estabelecida pela União Europeia seria adequada para o começo) estão entre os principais desafios a enfrentar.

Existem outras dificuldades que a experiência prática mostrou que constituem barreiras persistentes à gestão sustentável de resíduos. Vale ressaltar que a atratividade do baixo investimento associado ao aterro sanitário e a falta de conhecimento e engajamento da população para garantir a ampla reciclagem, que é essencial para aumentar o ciclo de vida dos produtos

(ou seja, economia circular), bem como a eficiência elétrica das tecnologias WtE representam barreiras para realizar uma gestão sustentável de resíduos. Além disso, como a maior parte dos resíduos nos SIDS é descartada em lixões a céu aberto e em aterros inadequados/não controlados, não há recursos humanos com conhecimento das melhores práticas de gestão. A Tabela 7 sintetiza algumas vantagens e desvantagens das tecnologias WtE.

**Tabela 7. Principais vantagens e desvantagens do WtE. Fonte:elaboração com base no Dvorák et al., 2009, Psomopoulos et al., 2009, Cheng e Hu, 2010, Gohlke et al., 2010, Tabasová et al., 2012, Cucchiella et al., 2014, Tozlu et al., 2015, Song et al., 2016, Neehaul et al., 2019, Bruno et al., 2021.**

Vantagens
Redução da dependência de energia fóssil.O terreno necessário é muito pequeno (a planta WtE que processa 1 milhão de toneladas/ ano requer menos de 100.000 m <sup>2</sup> de terreno, incluindo paisagismo e edifícios auxiliares). Por outro lado, para dispor esta quantidade de resíduos em aterro por 30 anos (vida útil da planta WtE) são necessários 3.000000 m <sup>2</sup> de área de terreno (PSOMOPOULOS et al., 2009).WtE pode variar de pequenas (32 - 227 toneladas/ dia) a grandes instalações (> 227 toneladas/dia).
Mitigação da emissão de GEE e conseqüentemente do aquecimento global visto que, em comparação com o aterro, WtE reduz as emissões de poluentes de RSU eliminando CH <sub>4</sub> e compensando as emissões de usinas de combustível fóssil.
Aumento da segurança energética urbana com a introdução de uma fonte alternativa.
Purificação da eliminação de resíduos.
Oportunidade de aproveitamento de cinzas de fundo na construção civil.
Maximização da energia contida nos gases de combustão.
Minimização do volume de resíduos destinados a aterro. Por exemplo, a incineração de RSU pode reduzir seu volume inicial em 90% e seu peso em 75%. A incineração evita a poluição aquosa e gasosa relacionada à deposição em aterro. O transporte de resíduos do ponto de origem para as plantas WtE requer menos custo logístico devido às baixas distâncias.
Apesar do maior custo do processo WtE em comparação com o aterro, ainda é a melhor opção devido a vários motivos, como redução da pegada ecológica e de carbono em SIDS.Cucchiella et al. (2014) observaram que, em comparação com outras fontes de energia renováveis (e.g., solar, geotérmica, biomassa e hidrelétrica), a recuperação de energia de RSU apresenta custo unitário inferior (\$/kWh) em paralelo com a energia eólica. Em relação à emissão de CO <sub>2</sub> por kWh de eletricidade, o RSU também é menos poluente do que o carvão, o petróleo e o gás natural, conforme relatado pela Agência de Proteção Ambiental dos EUA (USEPA) (PSOMOPOULOS et al., 2009, CUCCHIELLA et al., 2014).
Desvantagens
As indústrias WtE ainda produzem algumas emissões para o meio ambiente (e.g., incineração: CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , SO <sub>x</sub> , vaporização de metais pesados – Cu, Pb, Hg, Cd), mas existem tecnologias para controlar tais emissões.
Embora em pequena escala, o processamento térmico envolve preocupações com a geração de emissões de gases de combustão, presença de substâncias perigosas nas cinzas e poluição da água usada no processo de incineração.
O processamento térmico geralmente requer pré-tratamento, que envolve a classificação (e.g., fração leve – papel, plástico; fração pesada – substâncias biologicamente decomponíveis que podem ser processadas posteriormente por compostagem ou fermentação anaeróbica) e desintegração de resíduos, uma vez que RSU são comumente muito heterogêneos, especialmente em regiões com falta de conscientização da comunidade.

## CONCLUSÕES

Como o crescimento econômico implica uso intensivo de energia, é de extrema importância destacar que a transição para sistemas de energia renovável está entre os principais desafios do SIDS para reduzir a dependência da energia fóssil, a vulnerabilidade ao choque do preço do petróleo e apoiar meios de subsistência sustentáveis. O acesso a energia segura é vital para garantir educação, serviços públicos e outras metas de desenvolvimento sustentável que dependem de energia. Considerando o maior custo da energia fóssil e a alta concentração da população em áreas urbanas (Tabela 2 e Figura 2) levando a quantidade significativa de resíduos (Figura 3) disponíveis para recuperação de energia em SIDS, a adoção de tecnologias WtE fará uma contribuição significativa no que respeita ao fornecimento de energia e gestão sustentável de resíduos na área urbana.

As instalações WtE para gestão de RSU podem atender mais de 70 milhões de pessoas em SIDS (Tabela 2). Portanto, há uma clara oportunidade para adotar políticas socioeconômicas e ambientais que induzam a penetração de tecnologias inovadoras com foco na redução da produção de resíduos e no aumento da reciclagem para alinhar os SIDS aos países desenvolvidos da OCDE. Entre as razões para a ausência de investimentos em instalações WtE em SIDS está, naturalmente, o baixo custo associado à disposição em aterro, principalmente quando a maioria dos resíduos é descartada em aterros não controlados ou lixões a céu aberto. Portanto, para mudar a situação atual, deve-se atentar para o fato de que WtE pode reduzir: (i) significativamente o alto custo da eletricidade, substituindo as atuais usinas de combustível

fóssil por incineração de RSU que apresentam custo unitário (\$/kWh) tão baixo quanto o da energia eólica (CUCCHIELLA et al., 2014), mas tem a vantagem adicional de não ser dependente de variável não controlada (e.g., condições sinóticas que determinam a ocorrência, direção e velocidade do vento), (ii) a dependência do fornecimento de energia elétrica em relação ao comércio internacional (mercado de petróleo e transporte em grandes navios) devido à insularidade (Tabela 1) e (iii) impactos ambientais relacionados ao aquecimento global e à deterioração dos ecossistemas terrestres e aquáticos, respectivamente devido às emissões de GEE e descarga de poluentes no solo e corpos d'água (Tabela 6). Importa ressaltar que 80% da biomassa combustível presente no RSU é considerado combustível renovável, razão pela qual o Departamento de Energia dos Estados Unidos categorizou o RSU como biomassa (PSOMOPOULOS et al., 2009).

O processo termoquímico implica em menor uso de recursos terrestres (reduz a disposição de resíduos em aterro e a pegada ecológica) e está alinhado ao conceito de economia circular porque também envolve a recuperação de energia. Portanto, a ampla implementação de tecnologias WtE em SIDS está alinhada com os objetivos de desenvolvimento sustentável e contribui para a substituição de usinas de combustíveis fósseis, diversificação da fonte de energia e segurança de abastecimento.

De acordo com a análise realizada, pequenos municípios em qualquer país, seja ilha ou do interior, também podem promover a conscientização pública sobre a reciclagem, bem como avaliar a viabilidade (período de retorno dos investimentos) de plantas WtE em vez de transportar RSU para aterros distantes em outras regiões.

Este trabalho fornece aos políticos, gestores e demais profissionais as informações e indicadores úteis (Tabela 2, Figura 2, 3 e 4) para orientar a tomada de decisão em relação ao gerenciamento de RSU e fornecimento de energia renovável. A contribuição deste trabalho é relevante para definir um roteiro para atender às necessidades de energia, que é realizado considerando as múltiplas dimensões da sustentabilidade (econômica – incluindo tecnológica, ambiental e social), diversificação das fontes naturais de energia para minimizar a importação e uso racional (conservação e eficiência energética) que impactam o planejamento energético de longo prazo.

## AGRADECIMENTO

Este trabalho foi realizado com o apoio da PROEX-UNILA, da Fundação Araucária e da Secretaria de Estado da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior do Paraná (SETI)

## REFERENCES

1. Song, J.; Yang, W.; Li, Z.; Higano, Y.; Wang, X. Discovering the energy, economic and environmental potentials of urban wastes: An input-output model for a metropolis case. *Energy Conversion and Management* **2016**, 114, 168-179.
2. Rugani, B.; Roviani, D.; Hild, P.; Schmitt, B.; Benetto, E. Ecological deficit and use of natural capital in Luxembourg from 1995 to 2009. *Science of The Total Environment* **2014**, 468-469, 292–301. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.122>
3. International Energy Agency, IEA. *World energy outlook*. International Energy Agency, Paris, 2008.
4. Xie, H. Legal Regulation of Low-Carbon Economy. *IERI Procedia* **2014**, 8, 170–175. <http://doi.org/10.1016/j.ieri.2014.09.028>
5. United Nations. *The 2017 Revision of World Population Prospects*. Available online: <https://population.un.org/wpp/> (accessed on 18 Sept 2021).
6. Mata-Lima, H.; Silva, F.; Alvino-Borba, A.; Almeida, J.A. Environmental management in organizations: Is ISO 14001 implementation growing fast enough to improve environmental conditions in the metropolitan areas of developing countries? *Environmental Quality Management* **2014**, 24(2), 61-77. <http://doi.org/10.1002/tqem.21384>
7. United Nations. *Small Island Developing States and the UN - timeline*. Available online: <https://www.un.org/en/events/islands2014/smallislands.shtml> (accessed on 18 September 2021).
8. United Nations. *Percentage of population in urban and rural areas*. Available online: <https://population.un.org/wup/Country-Profiles/> (accessed on: 18 September 2021).
9. Psomopoulos, C.S.; Bourka, A.; Themelis, N.J. Waste-to-energy: A review of the status and benefits in USA. *Waste Management* **2009**, 29(5), 1718–1724.



- <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.11.020>
10. Pearce, D. Valuing natural resources and the implications for land and water management. *Resources Policy* **1987**, 13(4), 255–264. [https://doi.org/10.1016/0301-4207\(87\)90020-1](https://doi.org/10.1016/0301-4207(87)90020-1)
  11. Sun, M.; Wang, J.; He, K. Analysis on the urban land resources carrying capacity during urbanization-A case study of Chinese YRD. *Applied Geography* **2020**, 116, 102170.. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2020.102170>
  12. Gao, Q.; Fang, C.; Cui, X. Carrying capacity for SDGs: A review of connotation evolution and practice. *Environmental Impact Assessment Review* **2021**, 91, 106676. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2021.106676>
  13. United Nations. The millennium development goals report 2010. New York: United Nations, 2010.
  14. United Nations. Report of the United Nations conference on sustainable development. Rio de Janeiro, 20-22 June 2012. A/CONF.216/16. United Nations, New York. Available online: <http://www.uncsd2012.org/content/documents/814UNCSD%20REPORT%20final%20revs.pdf> (accessed on: 16 November 2015).
  15. United Nations. Transforming our world: the 2030 agenda for sustainable development. A/RES/70/1. United Nations, New York, 2015.
  16. Wolf, F.; Surroop, D.; Singh, A.; Leal, W. Energy access and security strategies in Small Island Developing States. *Energy Policy* **2016**, 98, 663–673. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.04.020>
  17. Mohee, R.; Mauthoor, S.; Bundhoo, Z.M.A.; Somaroo, G.; Soobhany, N.; Gunasee, S. Current status of solid waste management in small island developing states: A review. *Waste Management* **2015**, 43, 539-549. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.012>
  18. UNDESA. SIDS members states. Available online: <https://sustainabledevelopment.un.org/index.php?menu=1520> (accessed on: 20 February 2016).
  19. Cucchiella, F.; D'Adamo, I.; Gastaldi, M. Sustainable management of waste-to-energy facilities. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2014**, 33, 719–728. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2014.02.015>
  20. European Parliament. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC
  21. European Parliament. Directive 2018/850 of the European Parliament and of the Council of 30 May 2018 amending Directive 1999/31/EC on the landfill of waste.
  22. Pressley, P.N.; Aziz, T.N.; DeCarolis, J.F.; Barlaz, M.A.; He, F.; Li, F.; Damgaard, A. Municipal solid waste conversion to transportation fuels: a life-cycle estimation of global warming potential and energy consumption. *Journal of Cleaner Production* **2014**, 70, 145–153. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.02.041>
  23. Hampton, M.P.; Christensen, J. Competing industries in islands a new tourism approach. *Annals of Tourism Research* **2007**, 34(4), 998–1020. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2007.05.011>
  24. Scheyvens, R.; Momsen, J.H. Tourism and Poverty Reduction: Issues for Small Island States. *Tourism Geographies* **2008**, 10(1), 22–41. <https://doi.org/10.1080/14616680701825115>
  25. Noy, I. The macroeconomic consequences of disasters. *Journal of Development Economics* **2009**, 88(2), 221–231. <https://doi.org/10.1016/j.jdeveco.2008.02.005>
  26. Pratt, S. The economic impact of tourism in SIDS. *Annals of Tourism Research* **2015**, 52, 148–160. <https://doi.org/10.1016/j.annals.2015.03.005>
  27. Shah, K.U.; Niles, K. Energy policy in the Caribbean green economy context and the Institutional Analysis and Design (IAD) framework as a proposed tool for its development. *Energy Policy* **2016**, 98, 768–777. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.07.045>
  28. United Nations. World Population Prospects 2019. Available online: [https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019\\_DataBooklet.pdf](https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_DataBooklet.pdf) (accessed on: 20 September 2021).
  29. Worlddata. Geograpy. Available online: <https://www.worlddata.info/> (accessed on: 20 September 2021).

30. United Nations. World Population Prospects 2019. Available online: <https://population.un.org/wup/Country-Profiles/> (accessed on: 20 September 2021).
31. United Nations. UN Data – A world information. Available online: <http://data.un.org/Explorer.aspx> (accessed on: 20 September 2021).
32. World Bank. GDP per capita. Available online: <https://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.PCAP.CD?locations=BS> (accessed on: 20 September 2021).
33. United Nations. UN Data – A world information. Available online: <http://data.un.org/Data.aspx?d=ENV&f=variableID%3a1814> (accessed on: 20 September 2021).
34. European Parliament. Directive 2008/98/EC of the European parliament and of the Council of 19 November 2008 on waste and repealing certain directives. Official Journal of the European Communities. 22.11.2008; L. 312:3-30.
35. Zhang, C.; Hu, M.; Di Maio, F.; Sprecher, B.; Yang, X.; Tukker, A. An overview of the waste hierarchy framework for analyzing the circularity in construction and demolition waste management in Europe. *Science of The Total Environment* **2022**, 803, 149892. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.1498>
36. European Parliament. Directive 2008/1/EC of the European parliament and of the Council of 15 January 2008 concerning integrated pollution prevention and control. Official Journal of the European Communities. 29.1.2008; L. 24:8-29.
37. Surroop, D.; Raghoo, P. Energy landscape in Mauritius. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2017**, 73, 688–694. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.01.175>
38. Themelis, N.J. The role of waste-to-energy in urban infrastructure. *Metropolitan Sustainability* **2012**, 500–519. <https://doi.org/10.1533/9780857096463.3.500>
39. Clausen, A.; Pretz, T. The Relevance of Framework Conditions for Modelling GHG Emissions from rMSW Treatment Systems in EU. *Waste and Biomass Valorization* **2015**, 7(1), 175–191. <https://doi.org/10.1007/s12649-015-9428-6>
40. Anshassi, M.; Sackles, H.; Townsend, T.G. A review of LCA assumptions impacting whether landfilling or incineration results in less greenhouse gas emissions. *Resources, Conservation and Recycling* **2021**, 174, 105810. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.1058>
41. Fazeli, A.; Bakhtvar, F.; Jahanshaloo, L.; Che Sidik, N.A.; Bayat, A. E. Malaysia's stand on municipal solid waste conversion to energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2016**, 58, 1007–1016. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.270>
42. AlQattan, N.; Acheampong, M.; Jaward, F.M.; Ertem, F.C.; Vijayakumar, N.; Bello, T. Reviewing the potential of Waste-to-Energy (WTE) technologies for Sustainable Development Goal (SDG) numbers seven and eleven. *Renewable Energy Focus* **2018**, 27, 97–110. <https://doi.org/10.1016/j.ref.2018.09.005>
43. Xin-gang, Z.; Gui-wu, J.; Ang, L.; Yun, L. Technology, cost, a performance of waste-to-energy incineration industry in China. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2016**, 55, 115–130. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.137>
44. Tabasová, A.; Kropác, J.; Kermes, V.; Nemet, A.; Stehlik, P. Waste-to-energy technologies: Impact on environment. *Energy* **2012**, 44, 146-155. <http://doi.org/10.1016/j.energy.2012.01.014>
45. Pavlas, M.; Tous, M.; Bébar, L.; Stehlik, P. Waste to energy - An evaluation of the environmental impact. *Applied Thermal Engineering* **2010**, 30(16), 2326-2332. <http://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2009.10.019>
46. Valerio, F. Environmental impacts of post-consumer material managements: Recycling, biological treatments, incineration. *Waste Management* **2010**, 30(11), 2354–2361. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.05.014>
47. Eurostat. European Statistics 2019. Available online: [https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal\\_waste\\_statistics#Municipal\\_waste\\_treatment](https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Municipal_waste_statistics#Municipal_waste_treatment) (accessed on: 25 September 21).

48. Bruno, M.; Abis, M.; Kuchta, K.; Simon, F.-G.; Grönholm, R.; Hoppe, M.; Fiore, S. Material flow, economic and environmental assessment of municipal solid waste incineration bottom ash recycling potential in Europe. *Journal of Cleaner Production* **2021**, 317, 128511. <http://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128511>
49. Kalbe, U.; Simon, F.-G. Potential Use of Incineration Bottom Ash in Construction: Evaluation of the Environmental Impact. *Waste and Biomass Valorization* **2020**, 11(12), 7055–7065. <http://doi.org/10.1007/s12649-020-01086-2>
50. Aracil, C.; Haro, P.; Fuentes-Cano, D.; Gómez-Barea, A. Implementation of waste-to-energy options in landfill-dominated countries: Economic evaluation and GHG impact. *Waste Management* **2018**, 76, 443–456. doi:10.1016/j.wasman.2018.03.039
51. Silva, R.V.; de Brito, J.; Lynn, C.J.; Dhir, R.K. Environmental impacts of the use of bottom ashes from municipal solid waste incineration: A review. *Resource Conservation Recycling* **2019**, 140, 23–35. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.09.011>
52. Maria, F.D.; Sisani, F.; Lasagni, M.; El-Hoz, M. An hybrid approach for primary energy balance of an existing waste-to-energy plant. *Energy Procedia* **2018**, 148, 297–303. <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.08.081>
53. CEWEP. Cewep energy report III (Status 2007-2010). Available online: <https://www.cewep.eu/cewep-energy-efficiency-reports/> (accessed on: 20 September 2021).
54. Murer, M.J.; Spliethoff, H.; Waal, C.M.W. de; Wilpshaar, S.; Berkhout, B.; Berlo, M.A.J. van; Gohlke, O.; Martin, J.J. High efficient waste-to-energy in Amsterdam: getting ready for the next steps. *Waste Management & Research* **2011**, 29(10\_suppl), S20–S29. <http://doi.org/10.1177/0734242x11413334>
55. CEWEP. Country reports 2018. Confederation of European Waste-to-Energy Plants. Available online: <https://www.cewep.eu/country-reports-2018/> (accessed on: 20 September 2021)
56. Khoodaruth, A.; Oree, V.; Elahee, M.K.; Clark, W.W. Exploring options for a 100% renewable energy system in Mauritius by 2050. *Utilities Policy* **2017**, 44, 38–49. <http://doi.org/10.1016/j.jup.2016.12.001>
57. Shah, K.U.; Niles, K. Energy policy in the Caribbean green economy context and the Institutional Analysis and Design (IAD) framework as a proposed tool for its development. *Energy Policy* **2016**, 98, 768–777. <http://doi.org/10.1016/j.enpol.2016.07.045>
58. Sewak, A.; Deshpande, S.; Rundle-Thiele, S.; Zhao, F.; Anibaldi, R. Community perspectives and engagement in sustainable solid waste management (SWM) in Fiji: A socioecological thematic analysis. *Journal of Environmental Management* **2021**, 298, 113455. <http://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113455>
59. Aryampa, S.; Maheshwari, B.; Zamorano, M.; Sabiiti, E.N.; Olobo, C.; Bateganya, N.L. Adaptation of EVIAVE methodology to landfill environmental impact assessment in Uganda – A case study of Kiteezi landfill. *Journal of African Earth Sciences* **2021**, 183, 104310. <http://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2021.104>
60. Münster, M.; Meiborn, P. Optimization of use of waste in the future energy system. *Energy* **2011**, 36, 1612-1622. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.12.070>
61. Tan, S.T.; Hashim, H.; Lim, J.S.; Ho, W.S.; Lee, C.T.; Yan, J.Y. Energy and emissions benefits of renewable energy derived from municipal solid waste: analysis of a low carbon scenario in Malaysia. *Applied Energy* **2014**, 136, 797-804. <http://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.06.003>
62. Curry, N.; Pillay, P. Biogas prediction and design of a food waste to energy system for the urban environment. *Renewable Energy* **2012**, 41, 200-209. <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2011.10.019>
63. Tozlu, A.; Özahi, E.; Abuşoğlu, A. Waste to energy technologies for municipal solid waste management in Gaziantep. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2016**, 54, 809–815. <http://doi.org/10.1016/j.rser.2015.10.097>
64. Cheng, H.; Hu, Y. Municipal solid waste (MSW) as a renewable source of energy: Current and future practices in China. *Bioresource Technology* **2010**, 101, 3816-3824.

<http://doi.org/10.1016/j.biortech.2010.01.040>

65. Dvořák, R.; Pařízek, T.; Bébar, L.; Stehlík, P. Incineration and gasification technologies completed with up-to-date off-gas cleaning system for meeting environmental limits. *Clean Technologies and Environmental Policy* **2009**, 11(1), 95–105. <http://doi.org/10.1007/s10098-008-0170-7>
66. Gohlke, O.; Weber, T.; Seguin, P.; Laborel, Y. A new process for NO<sub>x</sub> reduction in combustion systems for the generation of energy from waste. *Waste Management* **2010**, 30(7), 1348–1354. <http://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.02.024>
67. Neehaul, N.; Jeetah, P.; Deenapanray, P. Energy recovery from municipal solid waste in Mauritius: Opportunities and challenges. *Environmental Development* 2019, 100489. <http://doi.org/10.1016/j.envdev.2019.100489>
68. Siddiqi, A.; Haraguchi, M.; Narayanamurti, V. Urban waste to energy recovery assessment simulations for developing countries. *World Development* **2020**, 131, 104949. <http://doi.org/10.1016/j.worlddev.2020.10494>