

MODELO DE PREVISÃO DA PRODUÇÃO DE BIOGÁS EM ATERRO SANITÁRIO. APLICAÇÃO AO ATERRO DE MATOSINHOS

Mário A. T. RUSSO ⁽¹⁾; José M. P. VIEIRA ⁽²⁾

RESUMO

O conhecimento da quantidade e da qualidade do biogás gerado num aterro sanitário de resíduos sólidos urbanos constitui informação imprescindível para a tomada de decisão quanto à gestão desta emissão gasosa, dado que o seu aproveitamento como combustível para produção de energia eléctrica exige quantidades mínimas para que o investimento seja sustentável economicamente. Uma forma de previsão do biogás produzido pressupõe a medição *in situ*, através da realização de furos na massa de resíduos de um aterro em funcionamento. Uma outra forma de o conseguir pode ser através de modelação matemática, aplicada ao cálculo do potencial de biogás de um aterro em funcionamento ou em projecto, entrando com as quantidades a movimentar em cada ano, as características dos resíduos e condições meteorológicas do local. No presente trabalho apresentam-se alguns aspectos importantes da construção de um modelo de previsão de produção de biogás aplicado ao caso do aterro sanitário de Matosinhos. Foram tidas em consideração as quantidades e características dos resíduos, as condições meteorológicas do local e utilizaram-se os resultados obtidos na calibração/avaliação das características do biogás produzido neste aterro sanitário. Foi, ainda, realizado um estudo comparado dos resultados assim obtidos com os resultantes da aplicação de outros modelos de previsão, recolhidos da literatura.

Palavras chave: aterro sanitário, biogás, modelo matemático, RSU.

¹ Doutor em Eng. Civil, Prof. Coordenador da E. S. T. G. do Instituto Politécnico de Viana do Castelo, Portugal

² Doutor em Eng. Civil, Prof. Catedrático da Escola de Engenharia da Universidade do Minho - Braga, Portugal

1 INTRODUÇÃO

O biogás produzido num aterro sanitário é proveniente da degradação, ao longo do tempo, da fracção orgânica biodegradável dos resíduos depositados. Constituído maioritariamente por CH_4 e CO_2 , dois dos gases que mais contribuem para o efeito de estufa, tem uma capacidade energética passível de aproveitamento depois da sua colecta e tratamento. Para tanto, torna-se necessário a instalação de equipamento dispendioso, para recolha, tratamento (enriquecimento da mistura ou separação do dióxido de carbono do metano) e geração de electricidade, que deverá ser avaliada em função do potencial de geração de biogás no aterro e respectiva vida útil. A previsão da quantidade e qualidade do biogás num aterro em funcionamento pode ser feita medindo-se directamente em poços, ou executando poços com esse fim específico, situação que constitui um procedimento dispendioso. Uma alternativa a este procedimento pode ser a modelação matemática, menos dispendiosa e com a vantagem adicional de se poder estudar a capacidade de geração de biogás num aterro ainda não construído. No presente trabalho, descreve-se a forma como foi elaborado e desenvolvido um modelo matemático para a previsão do biogás produzido no aterro sanitário (AS) do Concelho de Matosinhos. Partiu-se do conhecimento das características dos resíduos sólidos urbanos (RSU), das quantidades movimentadas ao longo dos anos no AS, das condições meteorológicas locais e de medições da quantidade e da qualidade do biogás gerado e estabeleceu-se um modelo de previsão que foi submetido a comparação com os dados de campo recolhidos *in situ* e com resultados gerados em outros modelos.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O biogás do aterro de Matosinhos foi objecto de acompanhamento da evolução da sua geração através da medição dos teores em CH_4 , CO_2 e O_2 , com equipamento portátil (medidor GasData LMS xi Standard, da MLU) com capacidade de resposta de 10 s para a medição do CH_4 e do CO_2 e de 20s para o O_2 , com um caudal de bombagem de 300mL/mim, podendo registar 2000 dados de 5 parâmetros, mais relações, data e tempo de realização da medição. O equipamento apresenta os

teores do metano e do dióxido de carbono ao fim de 10 segundos e o do oxigênio 10 segundos mais tarde, registrando a percentagem da sua distribuição em volume. Também, pode medir o caudal e a temperatura. O queimador instalado possui caudalímetro, relógio e analisador do biogás, cujos dados são registados para posterior análise.

2.1 Modelo de previsão da produção de biogás

O modelo de previsão da produção de biogás desenvolvido baseia-se na caracterização da composição química dos RSU depositados no AS, distinguindo-se a fracção orgânica nas suas componentes inertes e biodegradáveis, e destas, as rapidamente biodegradáveis e as lentamente biodegradáveis (Tchobanoglous, 1993). São ainda considerados os seguintes parâmetros: quantidade total de RSU operados por ano; precipitação infiltrada no aterro por ano (considerando a pluviosidade e a evapotranspiração); teor de humidade inicial dos resíduos e do material de cobertura; massa específica dos RSU e do material de cobertura; capacidade de campo nas diferentes camadas (células anuais RSU).

Conceptualmente, foi estabelecido um esquema do funcionamento do AS (Figura 1), em que a unidade de tempo é o ano, considerando-se que os RSU depositados nesse período constituem uma célula, cujo comportamento é uniforme na produção de biogás e de lixiviados (Russo, 2005).

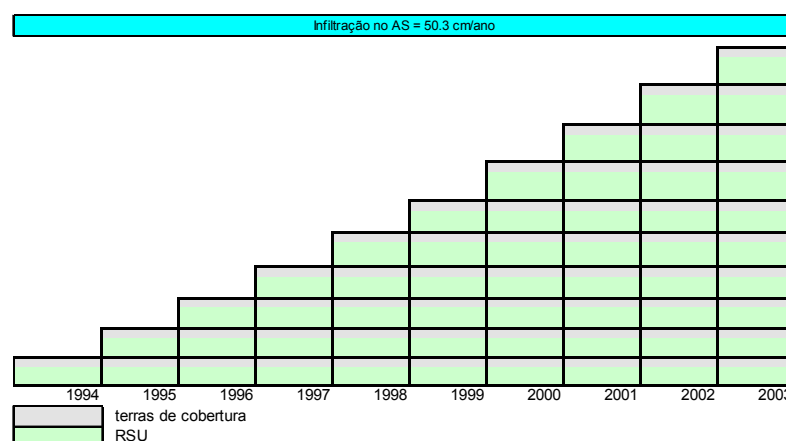


Figura 1 – Esquema conceptual de funcionamento do AS

Neste esquema consideraram-se algumas simplificações: consideração de que os resíduos depositados no AS constituem uma célula com altura de 3.00m e uma

cobertura de terras com 0.30m, ocupando uma área determinada; as células são justapostas anualmente; a geração de biogás só se inicia no fim do 1º ano de confinamento e cessa 15 anos depois.

Consideraram-se as seguintes fracções biodegradáveis dos RSU de Matosinhos (Quadro 1): (i) rapidamente biodegradáveis (restos alimentares, papel e cartão, 60% de resíduos de jardim e 50% da fracção outros); e (ii) lentamente biodegradáveis (madeira, têxteis, 60% de materiais finos e 40% de resíduos de jardins). O plástico (12%), outro dos resíduos de origem orgânica, foi considerado inerte.

Quadro 1 – Fracções de RSU Biodegradáveis de Matosinhos

	Matéria fresca (%)	H (%)	M seca
Restos alimentares	27.8	70%	8.34
Papel e Cartão	17.3	5.5%	16.3
Resíduos de Jardins (60%)	5.58	60%	2.2
Outros (50%)	2.5	6%	2.4
Rapidamente biodegradáveis (RB)			29.3
Madeira	1.00	20%	0.8
Têxteis	8.70	10%	7.8
Finos (60%)	7.8	15%	6.6
Resíduos de Jardins (40%)	3.72	60%	1.5
Lentamente biodegradáveis (LB)			16.7

Para o cálculo da composição química dos RSU, quer em termos globais quer da fracção orgânica, assumiu-se que a distribuição percentual dos elementos químicos (C,H,O,N,S) em cada uma das suas componentes é a que consta do Quadro 2.

Quadro 2 – Composição dos constituintes dos RSU (adaptado de Tchobanoglous *et al.*, 1993)

Componentes	Percentagem em massa (base seca)					
	C	H	O	N	S	cinzas
Mat Fermentável	48.0%	6.4%	37.6%	2.6%	0.4%	5.0%
Papel e Cartão	44.0%	5.9%	44.6%	0.3%	0.2%	5.0%
Verdes	47.8%	6.0%	38.0%	3.4%	0.3%	4.5%
Madeira	49.5%	6.0%	42.7%	0.2%	0.1%	1.5%
Plásticos	60.0%	7.2%	22.8%			10.0%
Têxteis	55.0%	6.6%	31.2%	4.6%	0.2%	2.5%
Vidro	0.5%	0.1%	0.4%	<0.1		98.9%
Metais	4.5%	0.6%	4.3%	<0.1		90.5%
Finos	26.3%	3.0%	2.0%	0.5%	0.2%	68.0%
Outros	44.7%	6.2%	38.4%	0.7%		9.9%

Nas Figuras 2 e 3 apresenta-se o fluxograma do modelo de funcionamento do AS de Matosinhos (Russo, 2005). O esquema de cálculo foi programado em Excel com interface gráfica VBA.

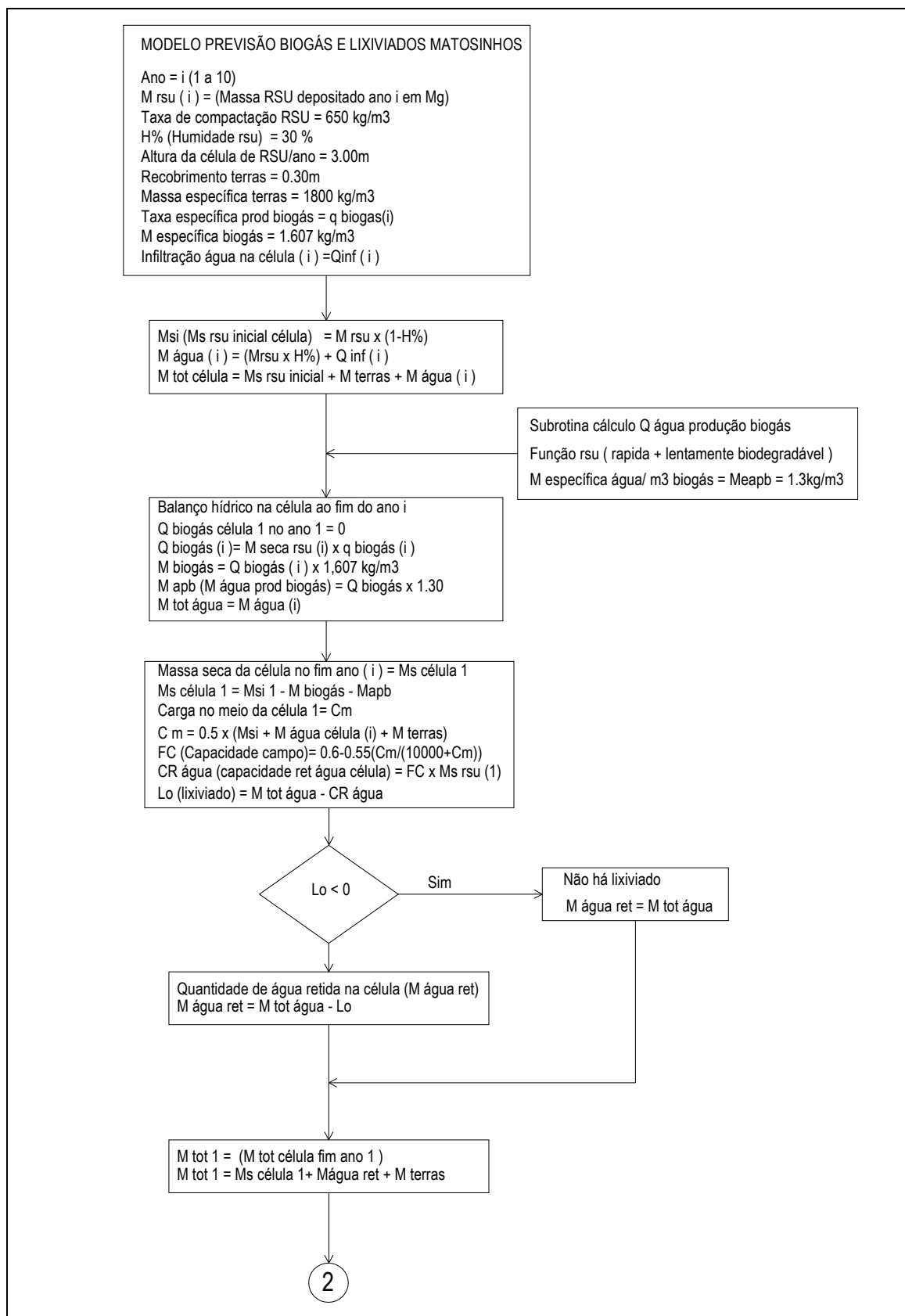


Figura 2 – Fluxograma do modelo – parte 1

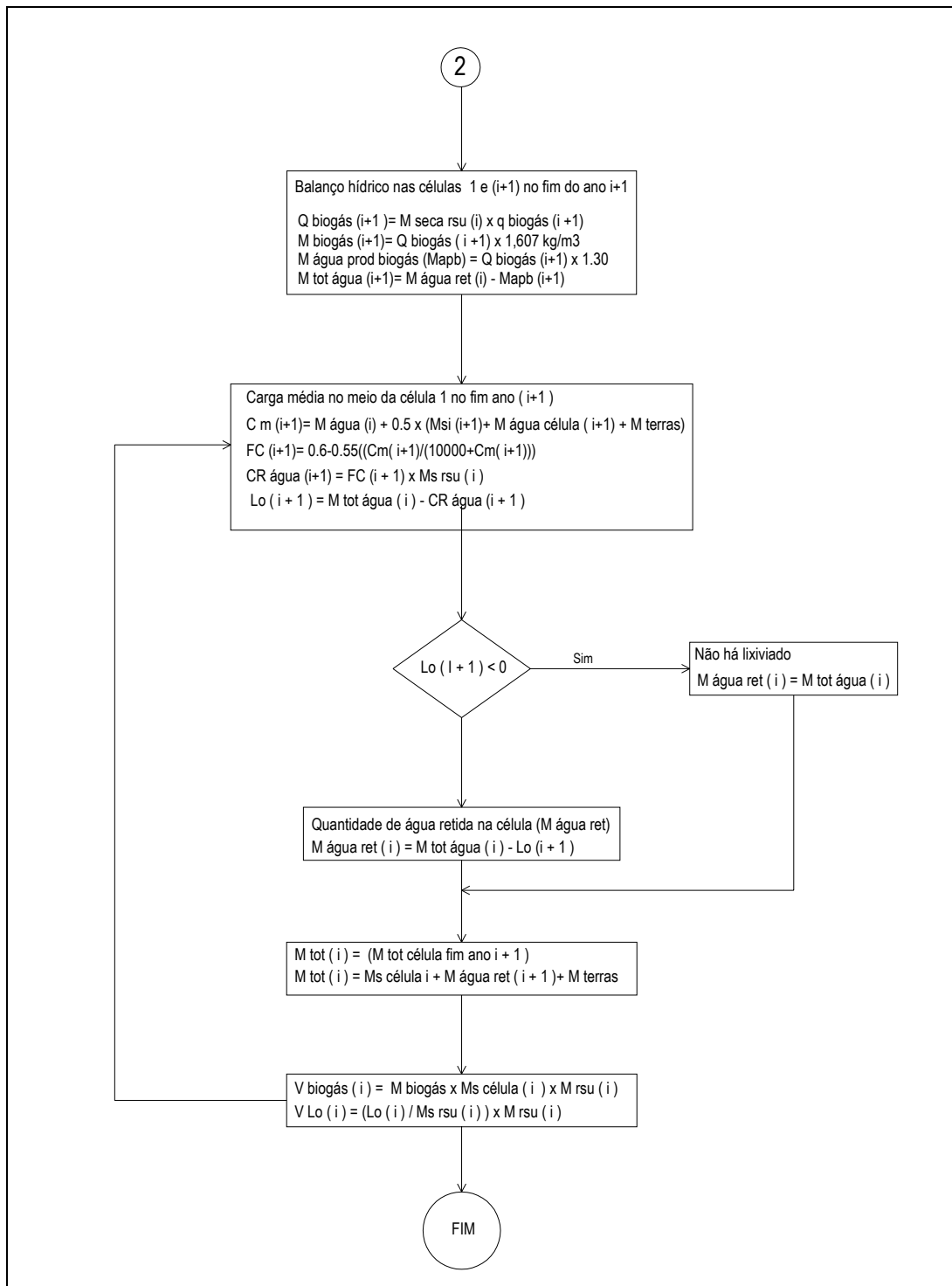


Figura 3 – Fluxograma do modelo – parte 2

Para efeitos de análise de sensibilidade e de avaliação dos resultados obtidos com o modelo proposto, foram utilizados dois modelos comparativos: um, mais simples, baseado na composição química dos RSU, na taxa específica de produção de biogás e na quantidade de RSU aterrados; e outro, mais sofisticado, o *Landfill Gas Emissions Model (LandGEM 3.02)* desenvolvido pela USEPA, Alexander *et al.* (2005), cuja versão permite a introdução de parâmetros mais consentâneos com as características dos resíduos e do local onde estão confinados.

Admitindo que o enxofre é marginal na constituição dos principais componentes dos RSU, a sua composição química pode ter formulação do tipo $C_aH_bO_cN_d$, em que a, b, c, d são os coeficientes, ou índices, dos elementos químicos que compõem a fórmula global dos RSU ou de cada uma das suas fileiras constitutivas. No Quadro 3 apresentam-se os valores desses índices e os cálculos intermédios.

Quadro 3 – Determinação dos coeficientes da fórmula química dos RSU biodegradáveis

Componente (fileira F_i)	Elementos			C	H	O	N	S	cinzas	
	Índices			a	b	c	d			
	Massa atómica (ma)			12	1	16	14	32		
	M fresca	H (%)	M seca	(kg/100 kg RSU)						
1 - Restos alimentares	27.8	70.0%	8.34	4.003	0.534	3.136	0.217	0.033	0.417	
2 - Papel e Cartão	17.3	5.5%	16.3	7.193	0.965	7.291	0.049	0.033	0.817	
3 - Resíduos jardins (60%)	5.58	60.0%	2.2	1.067	0.134	0.848	0.076	0.007	0.100	
4 - Outros (50%)	2.5	6.0%	2.4	1.050	0.146	0.902	0.016	0.000	0.233	
Rapidamente biodegradáveis (RB)	Σ			29.3	13.314	1.778	12.178	0.358	0.073	1.568
5 - Madeira	1.0	20.0%	0.8	0.396	0.048	0.342	0.002	0.001	0.012	
6 - Têxteis	8.7	10.0%	7.8	4.307	0.517	2.443	0.360	0.012	0.196	
7 - Finos (60%)	7.8	15.0%	6.6	1.744	0.199	0.133	0.033	0.013	4.508	
8 - Resíduos Jardins (40%)	3.72	60.0%	1.5	0.711	0.089	0.565	0.051	0.004	0.067	
Lentamente biodegradáveis (LB)	Σ			16.7	7.157	0.853	3.483	0.446	0.030	4.783
	nM _j (nº moles RB)			1.109	1.778	0.761	0.026	0.002	0.000	
	nM _j (nº moles LB)			0.596	0.853	0.218	0.032	0.001	0.000	
	nM _j (nº moles Total)			1.706	2.631	0.979	0.057	0.003	0.000	
Índices da Fórmula química aproximada sem enxofre normalizada para N=1										
	Índices			a	b	c	d	enxofre	cinzas	
	RB	N=1		43.4	69.5	29.7	1.0	0	0	
	LB	N=1		18.7	26.8	6.8	1.0	0	0	
	Total	N=1		29.7	45.8	17.0	1.0	0	0	

A massa de um determinado elemento químico de uma fileira é dada por: $m_{j,i} = mF_i E_j$

Em que:

$m_{j,i}$ é a massa seca do elemento químico j (C,H,O,N,S) da fileira i (1 a 8)

mF_i é a massa seca do material da fileira i

E_j é a massa atómica do elemento j

O número de moles do elemento j é dado por: $nM_j = \sum_{i=1}^8 m_{j,i} ma_j$

Em que ma_j é a massa atômica do elemento j

Os índices I_r ($r = a, b, c, d$) são dados por: $I_r = \frac{nM_j}{nM_N}$ em que nM_N é o número de moles do azoto (normalização de N).

Assim, considerando a totalidade dos constituintes orgânicos biodegradáveis dos RSU, a fórmula química calculada é dada por $C_{29.7}H_{45.8}O_{17}N$, normalizada para $N=1$ e desprezando o peso do enxofre no seu conjunto. Assim, para os constituintes rápida e lentamente biodegradáveis, a fórmula tomará os seguintes valores:

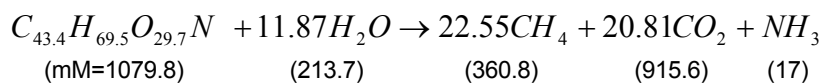
Rapidamente biodegradáveis – $C_{43.4}H_{69.5}O_{29.7}N$

Lentamente biodegradáveis – $C_{18.7}H_{26.8}O_{6.8}N$

A taxa específica anual de produção de biogás é determinada através da equação da degradação anaeróbia da matéria orgânica. Segue-se a determinação da taxa máxima de produção de biogás para os elementos rapidamente biodegradáveis (RB) e para os elementos lentamente biodegradáveis (LB), assumindo-se que a máxima taxa específica de produção de biogás dos elementos RB é atingida no fim do 1º ano e cessa a produção ao fim de 6 anos, enquanto que para os elementos LB o máximo é atingido no 6º ano e cessa ao fim de 15 anos.

Aplicando a equação da degradação anaeróbia completa, com os índices a, b, c, d da Tabela 3 resulta:

(i) Fração rapidamente biodegradável:



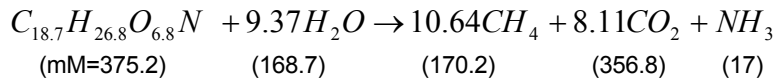
Para o caso dos RSU de Matosinhos, a massa seca de RB é de 29.4%, o que conduz aos seguintes volumes de CH_4 e CO_2 :

$$V_{CH_4} = \frac{360.8 \times Ms_{RB}}{1079.8 \times \delta_{CH_4}} = \frac{360.8 \times 29.4}{1079.8 \times 0.7176} = 13.69 m^3 / 100 kg_{RSU}$$

$$V_{CO_2} = \frac{915.6 \times Ms_{RB}}{1079.8 \times \delta_{CO_2}} = \frac{915.6 \times 29.4}{1079.8 \times 1.978} = 12.6 m^3 / 100 kg_{RSU}$$

Sendo as massas específicas $\delta_{CH_4} = 0.7176 \text{ kg/m}^3$ e $\delta_{CO_2} = 1.978 \text{ kg/m}^3$

(ii) Fracção lentamente biodegradável (massa seca de 16.7%):



$$V_{CH_4} = \frac{170.2 \times Ms_{LB}}{375.2 \times \delta_{CH_4}} = \frac{170.2 \times 16.7}{375.2 \times 0.7176} = 10.59 m^3 / 100 kg_{RSU}$$

$$V_{CO_2} = \frac{170.2 \times Ms_{LB}}{375.2 \times \delta_{CO_2}} = \frac{170.2 \times 16.7}{375.2 \times 1.978} = 8.05 m^3 / 100 kg_{RSU}$$

Os volumes teóricos dos gases de aterro, por kg de RSU, em função da velocidade de biodegradação dos seus constituintes, estão apresentados no Quadro 4.

Quadro 4 – Taxa específica teórica de gás de AS em função da velocidade de biodegradação

Componentes	Taxa específica (m ³ / kg RSU)		
	CO ₂	CH ₄	Biogás
Rapidamente biodegradável	0.126	0.137	0.263
Lentamente biodegradável	0.080	0.106	0.186
Total	0.207	0.243	0.449

Considerando volumes de biogás em base seca da matéria orgânica, teremos uma taxa específica de 0.894 m³/kg de RB (base massa seca) e de 1.113 m³/kg de LB (base massa seca).

Esta estimativa corresponde ao máximo de produção de biogás em condições óptimas de funcionamento do AS como bioreactor, supondo uma conversão completa da matéria orgânica. Seria necessário, entre outras condições, assegurar uniformidade de distribuição da humidade, o que não acontece, como se constatou da análise de diversas amostras da fracção sólida dos resíduos em profundidade que mostraram teores de humidade abaixo de 30%. Para a determinação da taxa específica de produção de biogás no AS de Matosinhos assumiu-se um rendimento metabólico de 25%, por comparação com dados de campo, cujos valores estão apresentados na Figura 4, calculados com base no modelo triangular de produção de biogás em AS, com os pressupostos anteriormente referidos.

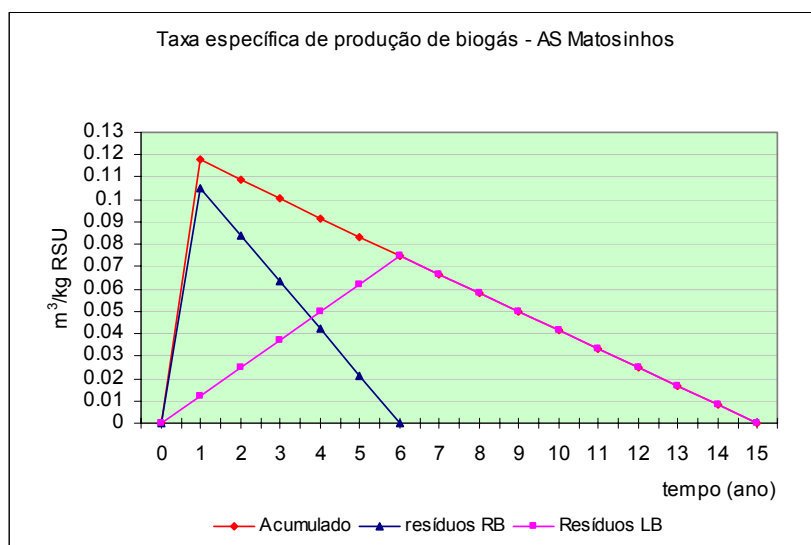


Figura 4 – Taxa específica de produção de biogás em Matosinhos

Este procedimento corresponde à subrotina de cálculo da taxa específica de produção de biogás ao longo do tempo, utilizada no modelo.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Figura 5 apresentam-se gráficos da produção de biogás calculados com base nos modelos de Matosinhos e LandGEM, que evidenciam um padrão semelhante. Na Figura 6 apresenta-se uma confrontação dos resultados obtidos com o modelo desenvolvido com os da medição de campo.

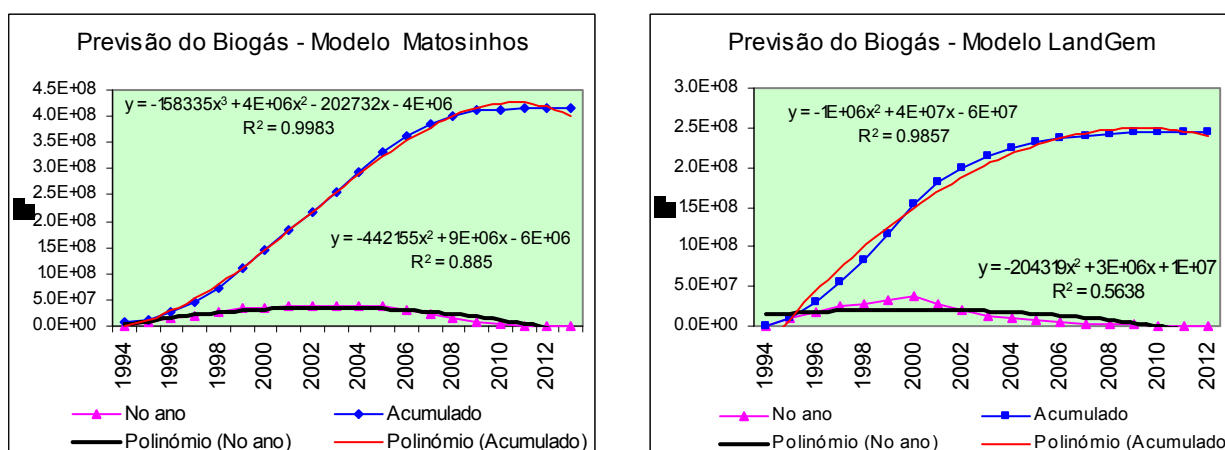


Figura 5 – Previsão de produção de biogás. Modelos Matosinhos e LandGEM

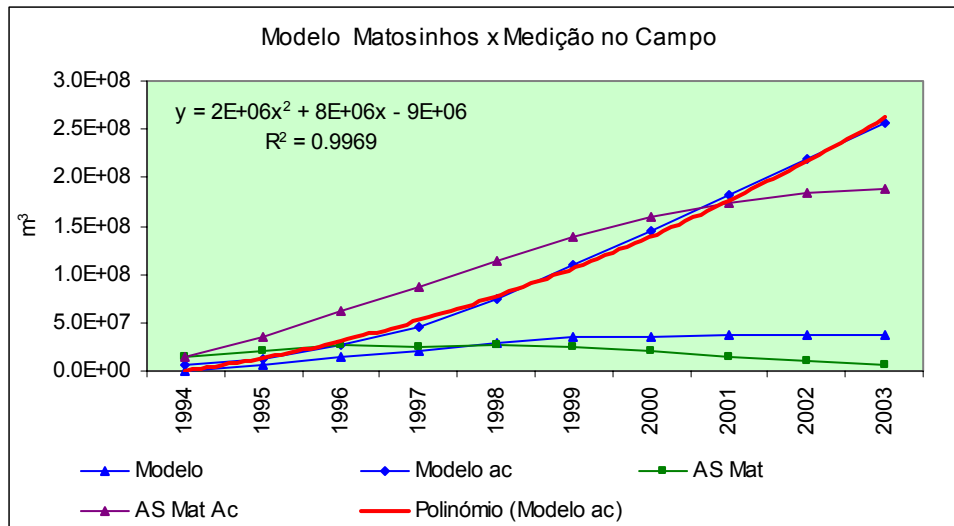


Figura 6 – Biogás medido no AS de Matosinhos e resultados do Modelo

Nos gráficos da Figura 7 são apresentadas as correlações evidenciadas pelos resultados obtidos com o modelo de Matosinhos e, respectivamente, as medições *in situ*, o modelo da composição química dos RSU e o modelo LandGEM 3.02.

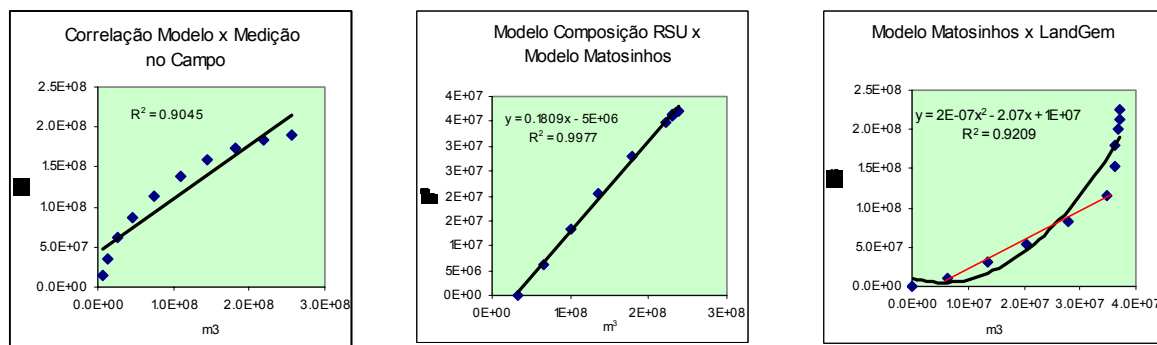


Figura 7 – Correlação entre os modelos de previsão da produção de biogás.

Os gráficos mostram as principais semelhanças entre os modelos de previsão do biogás, com evidente destaque para o modelo de Matosinhos e o da Composição química dos RSU. No caso Matosinhos - LandGEM 3.02, pode verificar-se que há elevada correlação de resultados para os primeiros anos, divergindo no final.

No Quadro 5 apresenta-se o resultado da aplicação dos modelos de previsão de biogás para as condições de Matosinhos, no período de 1994 a 2003, assumindo que não há contribuições de RSU anteriores a esta data e com base em pressupostos similares para os 3 modelos (Matosinhos, Composição química dos RSU e LandGEM v3.02).

Quadro 5 – Produção de biogás no AS de Matosinhos. Análise comparativa de modelos

Modelo	Taxa específica geração de biogás (m ³ /Mg)	Massa de RSU considerado Mg	% CH ₄	Produção de biogás (1994-2003) m ³
Matosinhos	118	5.31x10 ⁵	55%	2.18x10 ⁸
Composição Química RSU	118	5.31x10 ⁵	55%	2.39x10 ⁸
LandGEM 3.02	118	5.31x10 ⁵	55%	2.24x10 ⁸
Medição de campo		1.76x10 ⁵	55%	6.24x10 ⁷
Medição de campo corrigida		5.31x10 ⁵	55%	1.89x10 ⁸

À primeira vista parece haver um grande desvio entre os modelos e os resultados de campo. No entanto, o valor medido em campo reporta-se a 17 poços que cobrem uma área de influência de 12000 m², um volume de 252000 m³ e cerca de 176400 Mg de resíduos, ou seja, 33% dos resíduos considerados nos modelos de previsão. Assim, corrigindo-se para a quantidade de resíduos considerados nos modelos, constata-se que o desvio para o modelo de Matosinhos é de 13% e 15.6% para o LandGEM, valores que se podem considerar satisfatórios para a sua aplicabilidade na previsão de biogás em AS.

Com os resultados obtidos, pode estimar-se em 15% a eficiência de degradação dos resíduos orgânicos no aterro de Matosinhos, uma vez que a produção teórica máxima do biogás, considerando a degradação anaeróbia completa é de 1.25x10⁹ m³ e a produção medida no campo foi de 1.89x10⁸ m³.

4 CONCLUSÃO

O modelo de previsão da produção de biogás desenvolvido revelou ser aplicável à situação do aterro de Matosinhos e sugere que possa ser aplicado a outras situações semelhantes. O conhecimento aprofundado das características gravimétricas dos resíduos, do seu teor de humidade, da pluviosidade no local, da evapotranspiração, da humidade relativa e da temperatura do ar é condição necessária para uma boa estimativa do biogás produzido.

Ficou, ainda, evidenciada a comodidade de se poder dispor de modelos matemáticos validados para estudos, não só em fase de projecto como em fase de exploração de aterros sanitários.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alexander, A. *et al.* (2005): "Landfill Gas Emissions Model", Office of Research and Development of USEPA, Washington DC.
2. Russo, M. A. T. (2005): "Avaliação dos Processos de Transformação de Resíduos Sólidos Urbanos em Aterro Sanitário". Tese de doutoramento. Universidade do Minho.
3. Tchobanoglous, G., Theisen H., & Vigil, S. (1993): *Integrated Solid Waste Management: Engineering Principles Management Issues*, NY: McGraw-Hill, Inc.