

Tabela 3.1 – Dados sobre peso específico e teor de humidade típicos para resíduos residenciais, comerciais, industriais e agrícolas

Tipo de resíduo	Peso específico, lb/yd ³ ¹		Teor em humidade, % em peso	
	Gama	Típico	Gama	Típico
Residencial (não compactado)				
Resíduos alimentares (misturados)	220-810	490	50-80	70
Papel	70-220	150	4-10	6
Cartão	70-135	85	4-8	5
Plásticos	70-220	110	1-4	2
Têxteis	70-170	110	6-15	10
Borracha	170-340	220	1-4	2
Couro	170-440	270	8-12	10
Resíduos de pátios	100-380	170	30-80	60
Madeira	220-540	400	15-40	20
Vidro	270-810	330	1-4	2
Latas de estanho	85-270	150	2-4	3
Alumínio	110-405	270	2-4	2
Outros metais	220-1940	540	2-4	3
Sujidade, cinzas, etc.	540-1685	810	6-12	8
Cinzas	1095-1400	1255	6-12	6
Lixo	150-305	220	5-20	5
Resíduos de pátios residenciais				
Folhas (soltas e secas)	50-250	100	20-40	30
Erva verde (solta e húmida)	350-500	400	40-80	60
Erva verde (molhada e compactada)	1000-1400	1000	50-90	80
Resíduos de pátios (triturados)	450-600	500	20-70	50
Resíduos de pátios (compostados)	450-650	550	40-60	50
Municipal				
Em camião compactador	300-760	500	15-40	20
Em aterro				
Normalmente compactado	610-840	760	15-40	25
Bem compactado	995-1250	1010	15-40	25
Comercial				
Resíduos alimentares (húmidos)	800-1600	910	50-80	70
Máquinas	250-340	305	0-2	1
Caixotes de madeira	185-270	185	10-30	20
Desbaste de árvores	170-305	250	20-80	5
Lixo (combustível)	85-305	200	10-30	15
Lixo (não combustível)	305-610	505	5-15	10
Lixo (misturado)	235-305	270	10-25	15
Construção e demolição				
Demolição mista (não combustível)	1685-2695	2395	2-10	4
Demolição mista (combustível)	505-675	605	4-15	8
Construção mista (combustível)	305-605	440	4-15	8
Concreto partido	2020-3035	2595	0-5	-
Industrial				
Lamas químicas (húmida)	1350-1855	1685	75-99	80
Cinzas volantes	1180-1515	1350	2-10	4
Recortes de couro	170-420	270	6-15	10
Sucata metálica (pesada)	2530-3370	3000	0-5	-
Sucata metálica (leve)	840-1515	1245	0-5	-
Sucata metálica (mista)	1180-2530	1515	0-5	-
Óleos, alcatrões, asfaltos	1350-1685	1600	0-5	2
Serradura	170-590	490	10-40	20
Resíduos têxteis	170-370	305	6-15	10
Madeira (mista)	675-1140	840	30-60	25
Agrícola				
Agrícola (misto)	675-1265	945	40-80	50
Animais mortos	340-840	605	-	-
Resíduos de fruta (mistos)	420-1265	605	60-90	75
Estrume (húmido)	1515-1770	1685	75-96	94
Resíduos de vegetais (mistos)	340-1180	605	60-90	75

¹ 1kg/m³ = 1,6855 lb/yd³ ou lb/yd³ x 0,5933 = kg/m³

$$M = \left(\frac{w-d}{w} \right) 100 \quad (3.1)$$

onde M = teor de humidade, %

w = peso inicial da amostra como foi recebida, lb (kg)

d = peso da amostra após secagem a 105°C, lb (kg)

Exemplo: Calcule o teor de humidade total de uma amostra de RSU residencial, tal como foi recolhida, com a composição típica dada na tabela 2.5 (EUA).

Componente	Percentagem em peso	Teor em humidade, %	Peso seco, lb ¹
Orgânico			
Resíduos alimentares	9,0	70	2,7
Papel	34,0	6	32,0
Cartão	6,0	5	5,7
Plásticos	7,0	2	6,9
Têxteis	2,0	10	1,8
Borracha	0,5	2	0,5
Couro	0,5	10	0,4
Resíduos de pátios	18,5	60	7,4
Madeira	2,0	20	1,6
Orgânicos diversos	-	-	-
Inorgânicos			
Vidro	8,0	2	7,8
Latas de estanho	6,0	3	5,8
Alumínio	30,5	2	0,5
Outros metais	3,0	3	2,9
Sujidade, cinzas, etc.	3,0	8	2,8
Total	100,0		78,8

$$\text{Teor de humidade (\%)} = \left(\frac{100 - 78,8}{100} \right) 100 = 21,2\%$$

¹ baseado numa amostra de 100 lb, peso seco = % em peso x (100 - teor em humidade)/100

$$S_c = l \quad (3.2)$$

$$S_c = \left(\frac{l+w}{2} \right) \quad (3.3)$$

$$S_c = \left(\frac{l+w+h}{3} \right) \quad (3.4)$$

$$S_c = (l \times w)^{1/2} \quad (3.5)$$

$$S_c = (l \times w \times h)^{1/3} \quad (3.6)$$

onde S_c = granulometria do componente, em (mm)

l = comprimento, em (mm)

w = largura, em (mm)

h = altura, em (mm)

$$K = Cd^2 \frac{\gamma}{\mu} = k \frac{\gamma}{\mu} \quad (3.7)$$

onde K = coeficiente de permeabilidade

C = constante adimensional ou factor de forma

d = dimensão média dos poros

γ = peso específico da água

μ = viscosidade dinâmica da água

k = permeabilidade intrínseca

Tabela 3.2 – Dados típicos de análise inicial e energia para materiais encontrados em resíduos sólidos residenciais, comerciais, e industriais

Tipo de resíduo	Análise inicial, % em peso				Teor energético, Btu/lb ¹		
	Humidade	Matéria volátil	Carbono fixo	Não combustível	Como recolhido	Seco	Seco, sem cinzas
Comida e produtos alimentares							
Gorduras	2,0	95,3	2,5	0,2	16,135	16,466	16,836
Resíduos alimentares (mistos)	70,0	21,4	3,6	5,0	1,797	5,983	7,180
Resíduos de fruta	78,7	16,6	4,0	0,7	1,707	8,013	8,285
Resíduos de carne	38,8	56,4	1,8	3,1	7,623	12,455	13,120
Produtos de papel							
Cartão	5,2	77,5	12,3	5,0	7,042	7,428	7,842
Revistas	4,1	66,4	7,0	22,5	5,244	5,478	7,157
Papel de jornal	6,0	81,1	11,5	1,4	7,975	8,484	8,612
Papel (misto)	10,2	75,9	8,4	5,4	6,799	7,571	8,056
Cartões encerados	3,4	90,9	4,5	1,2	11,326	11,724	11,872
Plásticos							
Plásticos (mistos)	0,2	95,8	2,0	2,0	14,101	14,390	16,024
Polietileno	0,2	98,5	<0,1	1,2	18,687	18,724	18,952
Poliestireno	0,2	98,7	0,7	0,5	16,419	16,451	16,430
Poliuretano	0,2	87,1	8,3	4,4	11,204	11,226	11,744
Cloreto de polivinilo	0,2	86,9	10,8	2,1	9,755	9,774	9,985
Têxteis, borracha, couro							
Têxteis	10,0	66,0	17,5	6,5	7,960	8,844	9,827
Borracha	1,2	83,9	4,9	9,9	10,890	11,022	12,250
Couro	10,0	68,5	12,5	9,0	7,500	8,040	8,952
Madeira, árvores, etc.							
Resíduos de pátios	60,0	30,0	9,5	0,5	2,601	6,503	6,585
Madeira (tom verde)	50,0	42,3	7,3	0,4	2,100	4,200	4,234
Madeira dura	12,0	75,1	12,4	0,5	7,352	8,354	8,402
Madeira (mista)	20,0	68,1	11,3	0,6	6,640	8,316	8,383
Vidro, metais, etc.							
Vidro e minerais	2,0	-	-	96-99+	84	86	60
Metal, latas estanho	5,0	-	-	94-99+	301	319	317
Metal, ferroso	2,0	-	-	96-99+	-	-	-
Metal, não ferroso	2,0	-	-	94-99+	-	-	-
Diversos							
Limpeza escritórios	3,2	20,5	6,3	70,0	3,669	3,791	13,692
RSU residencial	21,0 (15-40)	52,0 (40-69)	7,0 (4-15)	20,0 (10-30)	5,000	6,250	8,333
RSU comercial	15,0 (10-30)	-	-	-	5,500	6,470	-
RSU	20,0 (10-30)	-	-	-	4,600	5,750	-

¹ Btu x 1,0551 = kJ

Tabela 3.3 – Dados típicos de análise final para materiais combustíveis encontrados em resíduos sólidos residenciais, comerciais, e industriais

Tipo de resíduo	% em peso (base seca)					
	Carbono	Hidrogénio	Oxigénio	Azoto	Enxofre	Cinzas
Comida e produtos alimentares						
Gorduras	73,0	11,5	14,8	0,4	0,1	0,2
Resíduos alimentares (mistos)	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Resíduos de fruta	48,5	6,2	39,5	1,4	0,2	4,2
Resíduos de carne	59,6	9,4	24,7	1,2	0,2	4,9
Produtos de papel						
Cartão	43,0	5,9	44,8	0,3	0,2	5,0
Revistas	32,9	5,0	38,6	0,1	0,1	23,3
Papel de jornal	49,1	6,1	43,0	<0,1	0,2	1,5
Papel (misto)	43,4	5,8	44,3	0,3	0,2	6,0
Cartões encerados	59,2	9,3	30,1	0,1	0,1	1,2
Plásticos						
Plásticos (mistos)	60,0	7,2	22,8	-	-	10,0
Polietileno	85,2	14,2	-	<0,1	<0,1	0,4
Poliestireno	87,1	8,4	4,0	0,2	-	0,3
Poliuretano ¹	63,3	6,3	17,6	6,0	<0,1	4,3
Cloreto de polivinilo ¹	45,2	5,6	1,6	0,1	0,1	2,0
Têxteis, borracha, couro						
Têxteis	48,0	6,4	40,0	2,2	0,2	3,2
Borracha	69,7	8,7	-	-	1,6	20,0
Couro	60,0	8,0	11,6	10,0	0,1	10,0
Madeira, árvores, etc.						
Resíduos de pátios	46,0	6,0	38,0	3,4	0,3	6,3
Madeira (tom verde)	50,1	6,4	42,3	0,1	0,1	1,0
Madeira dura	49,6	6,1	43,2	0,1	<0,1	0,9
Madeira (mista)	49,5	6,0	42,7	0,2	<0,1	1,5
Restos de madeira (mistos)	48,1	5,8	45,5	0,1	<0,1	0,4
Vidro, metais, etc.						
Vidro e minerais ²	0,5	0,1	0,4	<0,1	-	98,9
Metais (mistos) ²	4,5	0,6	4,3	<0,1	-	90,5
Diversos						
Limpeza escritórios	24,3	3,0	4,0	0,5	0,2	68,0
Óleos, tintas	66,9	9,6	5,2	2,0	-	16,3
RDF ³	44,7	6,2	38,4	0,7	<0,1	9,9

¹ O restante é cloro

² O teor orgânico provém dos revestimentos, etiquetas, e outros materiais anexos

³ RDF - Material que permanece após a retirada dos RSU dos materiais recicláveis e não combustíveis seleccionados

Exemplo: Determine a composição química da fracção orgânica, sem e com enxofre e sem e com água, de um RSU residencial com a composição típica mostrada na tabela 2.5 (EUA).

Começamos por estabelecer uma tabela de cálculo para determinar a distribuição percentual dos elementos principais que compoem o resíduo. Os cálculos necessários apresentam-se abaixo:

Componente ¹	Peso húmido, lb	Peso seco, lb	Composição, lb					
			C	H	O	N	S	Cinzas
Resíduos alimentares	9,0	2,7	1,30	0,17	1,02	0,07	0,01	0,14
Papel	34,0	32,0	13,92	1,92	14,08	0,10	0,06	1,90
Cartão	6,0	5,7	2,51	0,34	2,54	0,02	0,01	0,28
Plásticos	7,0	6,9	4,14	0,50	1,57	-	-	0,69
Têxteis	2,0	1,8	0,99	0,12	0,56	0,08	-	0,05
Borracha	0,5	0,5	0,39	0,05	-	0,01	-	0,05
Couro	0,5	0,4	0,24	0,03	0,05	0,04	-	0,04
Resíduos de pátios	18,5	6,5	3,11	0,39	2,47	0,22	0,02	0,29
Madeira	2,0	1,6	0,79	0,10	0,68	-	-	0,02
Total	79,5	58,1	27,39	3,62	22,97	0,54	0,10	3,48

Prepara-se uma tabela da distribuição percentual dos elementos contidos no resíduo, com e sem água.

Componente	Peso, lb	
	Sem H ₂ O	Com H ₂ O
Carbono	27,39	27,39
Hidrogénio	3,62	6,00
Oxigénio	22,97	41,99
Azoto	0,54	0,54
Enxofre	0,10	0,10
Cinzas	3,48	3,48

¹ Teor de humidade = 21,4 lb (79,5 lb – 58,1 lb)

Calcula-se a composição molar dos elementos, desprezando as cinzas.

Componente	Peso atómico ¹ , lb/mole	Moles	
		Sem H ₂ O	Com H ₂ O
Carbono	0,0265	1034,480	1034,480
Hidrogénio	0,0022	1625,774	2694,653
Oxigénio	0,0353	651,200	1190,417
Azoto	0,0309	17,484	17,484
Enxofre	0,0707	1,414	1,414

Determina-se uma fórmula química aproximada sem e com enxofre e sem e com água. Para isso estabelece-se uma tabela de cálculo para determinar relações molares normalizadas.

Componente	Relação molar (Azoto=1)		Relação molar (Enxofre=1)	
	Sem H ₂ O	Com H ₂ O	Sem H ₂ O	Com H ₂ O
Carbono	59,2	59,2	731,4	731,4
Hidrogénio	93,0	154,1	1149,4	1905,1
Oxigénio	37,2	68,1	460,4	841,6
Azoto	1,0	1,0	12,4	12,4
Enxofre	0,1	0,1	1,0	1,0

Assim, as fórmulas químicas sem enxofre são:

1. Sem água $C_{59,2}H_{93,0}O_{37,2}N$
2. Com água $C_{59,2}H_{154,1}O_{68,1}N$

As fórmulas químicas com enxofre são:

3. Sem água $C_{731,4}H_{1149,4}O_{460,4}N_{12,4}S$

Com água $C_{731,3}H_{1905,1}O_{841,6}N_{12,4}S$

¹ 1 lb = 453,6 g ou 1 g = 0,0022 lb

Tabela 3.4 – Dados típicos de análise final dos componentes combustíveis em RSU residenciais

Tipo de resíduo	% em peso (base seca)					
	Carbono	Hidrogénio	Oxigénio	Azoto	Enxofre	Cinzas
Orgânico						
Resíduos alimentares	48,0	6,4	37,6	2,6	0,4	5,0
Papel	43,5	6,0	44,0	0,3	0,2	6,0
Cartão	44,0	5,9	44,6	0,3	0,2	5,0
Plásticos	60,0	7,2	22,8	-	-	10,0
Têxteis	55,0	6,6	31,2	4,6	0,15	2,5
Borracha	78,0	10,0	-	2,0	-	10,0
Couro	60,0	8,0	11,6	10,0	0,4	10,0
Resíduos de pátios	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
Inorgânico						
Vidro ¹	0,5	0,1	0,4	<0,1	-	98,9
Metais ¹	4,5	0,6	4,3	<0,1	-	90,5
Sujidade, cinzas, etc.	26,3	3,0	2,0	0,5	0,2	68,0

$$\text{Btu/lb (base seca)} = \text{Btu/lb (como são postos de lado)} \left(\frac{100}{100 - \% \text{ humidade}} \right) \quad (3.8)$$

A correspondente equação numa base seca livre de cinzas é:

$$\text{Btu/lb (base seca sem cinzas)} = \text{Btu/lb (como são postos de lado)} \left(\frac{100}{100 - \% \text{ humidade} - \% \text{ cinzas}} \right) \quad (3.9)$$

¹ O teor orgânico provem dos revestimentos, etiquetas, e outros materiais anexos

Tabela 3.5 – Valores típicos para resíduos inertes e teor energético de RSU residenciais

Componente	Resíduo inerte, ¹ percentagem		Energia, ² Btu/lb	
	Gama	Típico	Gama	Típico
Orgânico				
Resíduos alimentares	2-8	5,0	1500-3000	2000
Papel	4-8	6,0	5000-8000	7200
Cartão	3-6	5,0	6000-7500	7000
Plásticos	6-20	10,0	12000-16000	14000
Têxteis	2-4	2,5	6500-8000	7500
Borracha	8-20	10,0	9000-12000	10000
Couro	8-20	10,0	6500-8500	7500
Resíduos de pátios	2-6	4,5	1000-8000	2800
Madeira	0,6-2	1,5	7500-8500	8000
Orgânicos diversos	-	-	-	-
Inorgânico				
Vidro	96-99+	98,0	50-100 ³	60
Latas de estanho	96-99+	98,0	100-500 ³	300
Alumínio	90-99+	96,0	-	-
Outro metal	94-99+	98,0	100-500 ³	300
Sujidade, cinzas, etc.	60-80	70,0	1000-5000	3000
Resíduos sólidos urbanos			4000-6000	5000 ⁴

$$\text{Btu/lb} = 145C + 610 \left(H_2 - \frac{1}{8} O_2 \right) + 40S + 10N \quad (3.10)$$

onde C = carbono, percentagem em peso

H₂ = hidrogénio, percentagem em peso

O₂ = oxigénio, percentagem em peso

S = enxofre, percentagem em peso

N = azoto, percentagem em peso

¹ Após combustão completa

² Numa base tal como são postos de lado

³ O teor energético provem dos revestimentos, etiquetas, e outros materiais anexos

⁴ O valor ↗ deve-se à reduzida quantidade de resíduos de alimentos em bruto e crescente % de plástico

Exemplo: Determine o valor energético de um RSU residencial típico com a composição média da tabela 2.5 (EUA).

Assume-se que o valor do aquecimento será calculado numa base tal como o resíduo é descartado (posto de lado).

Determina-se o teor energético total utilizando os dados da tabela 3.5, de forma a efectuar os cálculos necessários:

Componente	Resíduos sólidos, lb	Energia, Btu/lb ¹	Energia total, Btu
Orgânico			
Resíduos alimentares	9,0	2000	18000
Papel	34,0	7200	244800
Cartão	6,0	7000	42000
Plásticos	7,0	14000	98000
Têxteis	2,0	7500	15000
Borracha	0,5	10000	5000
Couro	0,5	7500	3750
Resíduos de pátios	18,5	2800	51800
Madeira	2,0	8000	16000
Inorgânico			
Vidro	8,0	60	480
Latas de estanho	6,0	300	1800
Alumínio	0,5	-	-
Outro metal	3,0	300	900
Sujidade, cinzas, etc.	3,0	3000	9000
Total	100,0		506530

Determina-se o teor energético na base de tal como os resíduos são descartados, por lb de resíduo:

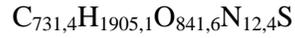
$$\text{Teor energético} = \frac{506530 \text{ Btu}}{100 \text{ lb}} = \frac{5065 \text{ Btu}}{\text{lb}} = \frac{11,782 \text{ kJ}}{\text{kg}}$$

O valor calculado está de acordo com o valor típico dado na tabela 3.5.

¹ Btu/lb x 2,326 = kJ/kg

Exemplo: Determine o valor energético de um RSU residencial típico com a composição média determinada no penúltimo exemplo incluindo enxofre e água.

A composição química do resíduo incluindo enxofre e água é:



Determinemos o teor energético total usando a equação 3.10. Começemos por determinar a distribuição percentual em peso dos elementos que compõem o resíduo, usando coeficientes que foram arredondados.

Componente	Número de átomos por mole	Peso atômico	Contribuição do peso de cada elemento	%
Carbono	731,4	12	8777	36,03
Hidrogénio	1905,1	1	1905	7,82
Oxigénio	841,6	16	13466	55,30
Azoto	12,4	14	174	0,72
Enxofre	1,0	32	32	0,13
Total			24354	100,00

O teor energético do resíduo utilizando a equação (3.10) é:

$$\text{Btu/lb} = 145(36,0) + 610 \left(7,8 - \frac{55,3}{8} \right) + 40(0,1) + 10(0,7) = 5772^1$$

¹ O teor de energia do resíduo é superior ao encontrado no exemplo anterior somente porque a fracção orgânica dos RSU residenciais foi considerada no penúltimo exemplo.

Tabela 3.6 – Análise elementar dos materiais orgânicos usados como alimento nos processos de conversão biológica

Constituinte	Unidade	Substrato alimentar (base seca)			
		Papel de jornal	Papel de escritório	Resíduos de pátios	Resíduos alimentares
NH ₄ -N	ppm	4	61	149	205
NO ₃ -N	ppm	4	218	490	4278
P	ppm	44	295	3500	4900
PO ₄ -P	ppm	20	164	2210	3200
K	%	0,35	0,29	2,27	4,18
SO ₄ -S	ppm	159	324	882	855
Ca	%	0,01	0,10	0,42	0,43
Mg	%	0,02	0,04	0,21	0,16
Na	%	0,74	1,05	0,06	0,15
B	ppm	14	28	88	17
Se	ppm	-	-	<1	<1
Zn	ppm	22	177	20	21
Mn	ppm	49	15	56	20
Fe	ppm	57	396	451	48
Cu	ppm	12	14	7,7	6,9
Co	ppm	-	-	5,0	3,0
Mo	ppm	-	-	1,0	<1
Ni	ppm	-	-	9,0	4,5
W	ppm	-	-	4,0	3,3

$$BF = 0,83 - 0,028 TL \quad (3.11)$$

onde BF = fracção biodegradável expressa na base de sólidos voláteis

0,83 = constante empírica

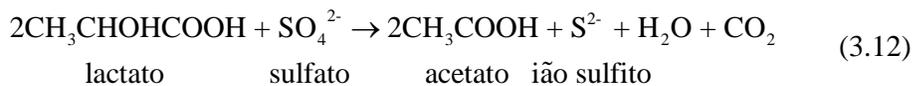
0,028 = constante empírica

TL = teor em lenhina dos SV expresso em percentagem de peso seco

Tabela 3.7 – Dados sobre a fracção biodegradável dos componentes orgânicos dos resíduos baseados no teor em lenhina

Componente	Sólidos voláteis (SV), percentagem dos sólidos totais (ST)	Teor em lenhina (TL), percentagem em SV	Fracção biodegradável (FB) ¹
Resíduos alimentares	7-15	0,4	0,82
Papel			
Papel de jornal	94,0	21,9	0,22
Papel de escritório	96,4	0,4	0,82
Cartão	94,0	12,9	0,47
Resíduos de pátios	50-90	4,1	0,72

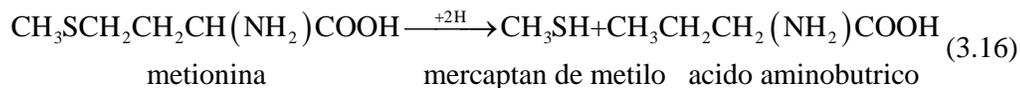
A formação de H₂S pode ser ilustrada pelas seguintes séries de reacções:



O ião sulfito pode também combinar-se com sais metálicos que podem estar presentes, tal como o ferro, para formar iões sulfito.



Redução da metionina:

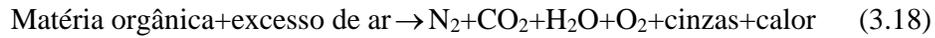


O mercaptan de metilo pode ser hidrolizado bioquimicamente em álcool metilo e sulfito de hidrogénio:

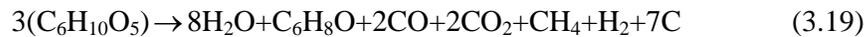


¹ Calculado utilizando a equação anterior

Na presença de excesso de ar e sob condições ideais, a combustão da fracção orgânica dos RSU é representada pela seguinte equação:

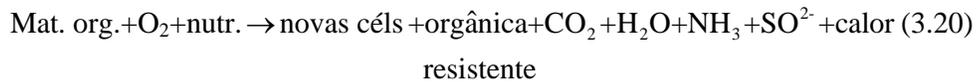


No caso da celulose ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{O}_5$), foi sugerida a seguinte expressão como sendo representativa da reacção de pirólise:



A compostagem da fracção orgânica dos RSU sob condições aeróbicas pode ser representada pela seguinte equação:

mat.



A porção biodegradável da fracção orgânica dos RSU pode ser convertida biologicamente sob condições anaeróbicas em gás dióxido de carbono e metano (CH_4). Esta conversão pode ser representada pela seguinte equação:

mat.

