

## DIMENSIONAMENTO DE UM INCINERADOR TIPO FORNO ROTATIVO PARA RESÍDUOS DE SERVIÇO DE SAÚDE

### Amauri Menezes Leal Júnior

Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá  
R. Antonino Rosa Júnior, 168, Centro, Lorena, CEP: 12.602-040, SP  
amaurileal@yahoo.com.br

### João Andrade de Carvalho Júnior

Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá  
Av Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá, SP, CEP:12516-410, C.P. 205  
joão@feg.unesp.br

**Resumo.** O crescimento populacional é uma preocupação constante para os governos sob o ponto de vista da qualidade de vida. Quanto menor a qualidade de vida, maiores são os problemas relacionados à saúde devido a periculosidade dos resíduos. Este artigo apresenta uma metodologia para o dimensionamento das câmaras primária e secundária de um incinerador tipo forno rotativo, para resíduos de serviço de saúde. Tal metodologia foi realizada a partir dos balanços de massa e energia da combustão no incinerador capaz de processar resíduos à razão de 100 kg/h, utilizando gás natural como combustível auxiliar. O estudo foi realizado a partir de dados da composição média dos resíduos gerados no Hospital Frei Galvão, município de Guaratinguetá/SP, que possui 150 leitos. Foram considerados, para a câmara primária e secundária, as temperaturas de 1000°C e 1200°C, respectivamente e tempos de residência de 2 segundos. Posteriormente, foi analisado o comportamento da temperatura, da relação entre a vazão mássica de resíduo e a vazão mássica de combustível auxiliar e do excesso de oxidante, na câmara primária, mediante a variação da umidade no resíduo. Conclui-se que os resíduos de serviço de saúde utilizados no estudo não apresentaram um poder calorífico capaz de sustentar a combustão sendo necessário o auxílio de outro combustível (gás natural). Desta maneira com uma relação entre a vazão mássica do resíduo e a vazão mássica do combustível auxiliar ( $\beta$ ) de 8 e excesso de ar ( $\alpha$ ) de 2,1 foi mantida a temperatura do projeto. No projeto da câmara primária foram obtidos o comprimento, volume e diâmetro da câmara de respectivamente 3,32 m, 2,35 m<sup>3</sup> e 0,95 m. Para o projeto da câmara secundária foram determinados o comprimento aproximadamente igual a 3,4 m, diâmetro igual a 0,95 m, perfazendo um volume de aproximadamente 2,4 m<sup>3</sup>.

*Palavras-chave:* Incinerador, resíduos de serviço de saúde, composição do resíduo, balanço de massa e energia, combustão.

### 1. Introdução

O crescimento populacional pode ser encarado como uma preocupação constante para os governos quando observado do ponto de vista da qualidade de vida. Quanto menor a qualidade de vida, mais problemas relacionados à saúde emergem, aumentando, assim, a periculosidade dos resíduos que de alguma forma podem trazer problemas fitossanitários à população caso não sejam tratados adequadamente.

De acordo com Moreira (1995), os fatores que influenciam a geração dos resíduos podem ser: número de habitantes locais; área relativa de produção; condições climáticas; hábitos e costumes da população; nível educacional; poder aquisitivo; tempo e eficiência da coleta; tipo de equipamento da coleta; leis e regulamentações específicas.

Segundo Lora (2000), os métodos tradicionais de tratamento de resíduos são: deposição direta em aterros; armazenagem em lagoas superficiais e injeção em poços profundos. Sendo estes substituídos na atualidade por: minimização dos resíduos na fonte de geração e reutilização dos resíduos; tratamento físico-químico-biológico; incineração; métodos de estabilização química e solidificação.

Embora a incineração constitua hoje um recurso largamente empregado no tratamento de resíduos, tendo em vista a alta eficiência de destruição e aplicabilidade para um grande espectro de produtos terminais, a consciência pública é hoje um severo censor para as questões de meio ambiente. Tal fato exige que o projeto de um incinerador seja o resultado de uma criteriosa atividade de engenharia que garanta máxima eficiência e mínima interferência com os mecanismos ecológicos. Praticamente todo tipo de resíduo é passível de incineração, desde aqueles com alto teor de compostos orgânicos até os que os possuem em pequenas quantidades. O processo consiste da decomposição térmica a alta temperatura visando a destruição da fração orgânica, com a conseqüente redução de volume de resíduos estocados.

Este artigo apresenta uma metodologia para o dimensionamento das câmaras primária e secundária de um incinerador tipo forno rotativo, para resíduos de serviço de saúde. Tal metodologia foi realizada a partir dos balanços de massa e energia da combustão no incinerador capaz de processar resíduos à razão de 100 kg/h, utilizando gás natural como combustível auxiliar. O estudo foi realizado a partir de dados da composição média dos resíduos gerados no Hospital Frei Galvão, município de Guaratinguetá/SP, que possui 150 leitos. Foram considerados, para a câmara primária e secundária, as temperaturas de 1000°C e 1200°C e os tempos de residência de 2 segundos, respectivamente. Posteriormente, foi analisado o comportamento da temperatura, da relação entre a vazão mássica de resíduo e a vazão mássica de combustível auxiliar e do excesso de oxidante, na câmara primária, mediante a variação da umidade no resíduo.

## 2. Incineração

A incineração é considerada uma forma de disposição final, constituindo-se em um método de tratamento através da decomposição térmica. Seu objetivo maior é a redução da toxicidade e do volume dos resíduos. O porte das unidades de incineração podem variar desde pequenas, sendo projetadas e dimensionadas para um resíduo específico, até grandes instalações com múltiplos propósitos, para incinerar resíduos de diferentes fontes. (INCINERAÇÃO, s.d.).

Além de atingir os objetivos a que a incineração se propõe, deve-se levar em conta a valorização energética advinda dos resíduos. O impacto ambiental decorrente do emprego das plantas de incineração pode ser minimizado com a utilização de equipamentos que eliminam os produtos tóxicos e reduzem a necessidade dos aterros controlados. Deve-se ter em mente que as plantas de incineração não eliminam outros sistemas de tratamento, tais como reciclagem, compostagem, aterros sanitários entre outros, mas devem ser considerados como complementares. A incineração, em um programa de gestão, apresenta vantagens como (SILVA, 1998): redução do peso dos resíduos a serem aterrados; eliminação dos resíduos de forma rápida e segura; acompanhamento e controle contínuo das emissões gasosas; eliminação do risco de combustão espontânea, o que acontece frequentemente nos aterros; eliminação da possibilidade de contaminação dos lençóis freáticos por lixiviação e geração de maus odores.

A incineração é definida como sendo um processo de redução a aproximadamente 15% no peso e 25% no volume de um resíduo, por intermédio de uma combustão controlada, onde a temperatura, a turbulência e o tempo de residência são os fatores de principal influência. A eficiência do processo de incineração reside em dois pontos fundamentais: manutenção da mistura ar-combustível nos níveis exigidos pelo projeto, o que é obtido regulando-se a quantidade de ar injetado e da transferência da maior quantidade de calor gerado durante a combustão, para a massa de resíduos a ser incinerada. Quatro grandes subsistemas podem ser incorporados em um sistema de incineração de resíduos: preparação e alimentação do resíduo; câmara(s) de combustão; controle dos poluentes atmosféricos e manuseio da cinza/resíduo.

### 2.1. Incinerador tipo Forno Rotativo

O forno rotativo é um cilindro horizontal revestido internamente com refratários, cuja montagem se faz com uma pequena inclinação. A Fig. 1 mostra o esquema deste tipo de incinerador (DEMPSEY; OPPELT, 1993). O movimento rotacional do forno favorece a passagem do resíduo no seu interior melhorando a homogeneização do resíduo. Em relação ao fluxo de gás tem-se dois tipos de movimento do resíduo, que pode ser concorrente ou em contracorrente. De acordo com Dempsey e Oppelt (1993) o tempo de residência dos resíduos no forno é de 0,5 a 1,5 horas, sendo que o controle deste tempo de residência dos sólidos ocorre pela velocidade rotacional do forno (0,5 a 1,0 rpm), pela taxa de alimentação de resíduos e, algumas vezes, pela inclusão de barreiras internas que tem a função de retardar o movimento do resíduo através do forno. O limite da quantidade de resíduo processado no forno pode ser ajustado para quase 20 % do volume do forno controlando-se a taxa de alimentação.

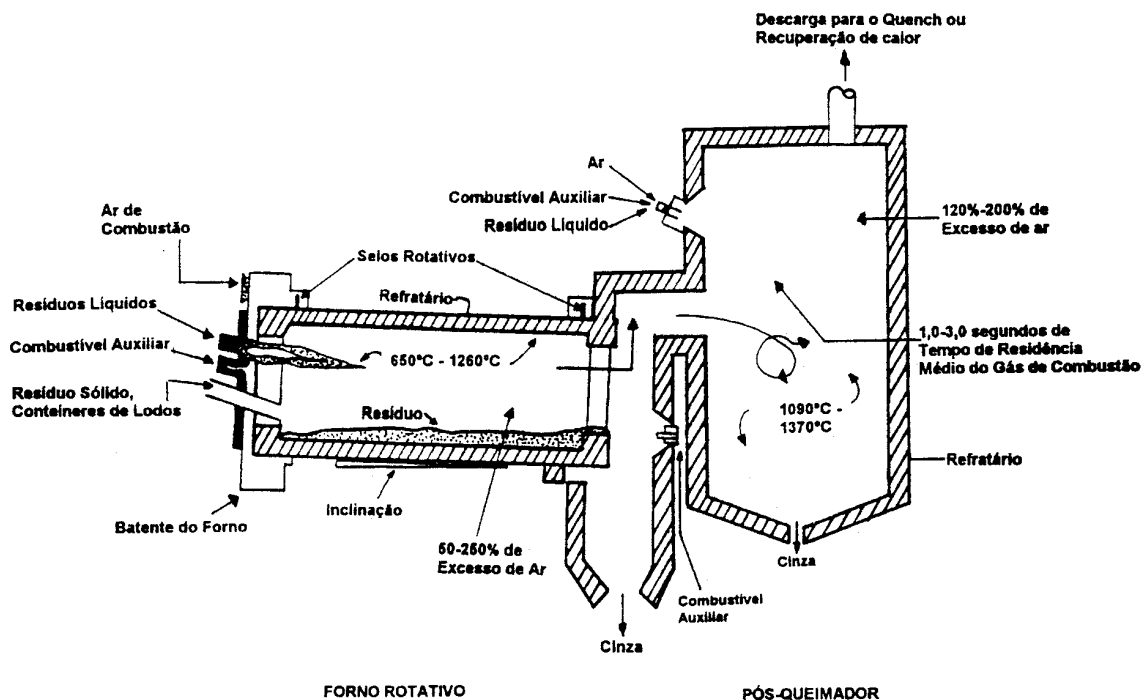


Figura 1 - Incinerador Tipo Rotativo [DEMPSEY; OPPELT, 1993]

O forno tem como primeira função transformar os resíduos sólidos em gases, por meio de uma série de volatilizações, destilação destrutiva e reações parciais de combustão. Porém, para completa combustão da fase gasosa é necessário um pós-queimador. O pós-queimador é posicionado diretamente à extremidade de descarga do forno, cujos gases ao saírem, estarão direcionados à câmara de pós-queima. Devido à presença de partículas sólidas alguns sistemas mais recentes têm em sua concepção um “ciclone quente” entre o forno e o pós-queimador. Tal equipamento tem a função de remover essas partículas sólidas evitando problemas de entupimento no pós-queimador. O alinhamento dos pós-queimadores pode ser vertical ou horizontal mantendo suas funções básicas e os mesmos princípios do incinerador de injeção líquida.

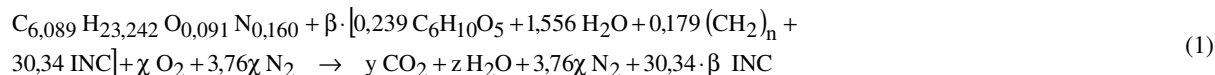
## 2.2. Dimensionamento de um incinerador

Para o desenvolvimento do cálculo no dimensionamento foi considerado para a câmara primária a temperatura de 1000°C e tempo de residência de 2 segundos e para a câmara secundária a temperatura de 1200°C e tempo de residência de 2 segundos. Deve-se ter em mente que tais parâmetros podem variar dependendo do tipo de resíduo e das necessidades do cliente. O presente estudo foi realizado a partir de dados coletados da composição média dos resíduos do serviço de saúde gerados no Hospital Frei Galvão, no município de Guaratinguetá, SP, que possui 150 leitos. A composição média dos resíduos considerados neste estudo foi: papel (32,3%); gesso, agulhas, vidros (30,3%); água (6,5%); gazes, comprimidos (6,5%); plásticos (2,9%); Resíduos de lanchonete (21,5%). De acordo com Oliveira (2001), os valores para o poder calorífico inferior médio de resíduos são: 15.814 kJ/kg para o papel, 15.814 kJ/kg para as gazes e comprimidos e 32.790 kJ/kg para os plásticos misturados. Já de acordo com Wark e Richards (1999), o calor latente de vaporização da água a 25°C e 1 atm é de, aproximadamente, 2.440 kJ/kg. Com isso o PCI médio calculado dos resíduos foi de 6.390 kJ/kg.

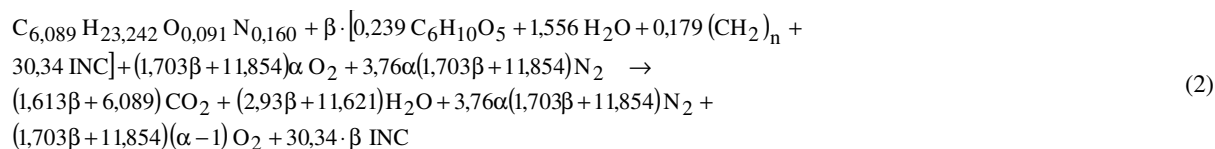
O combustível auxiliar adotado foi o gás natural - GN (gasoduto Bolívia-Brasil) que é constituído principalmente de metano (aproximadamente 91%) e possui um PCI de 47.600 kJ/kg.

## 3. Reação de Combustão

Para a reação estequiométrica incluindo o resíduo e considerando que 100g de GN vão incinerar 100βg de resíduos, sendo β a relação entre a vazão mássica do resíduo e a vazão mássica do combustível auxiliar, e considerando-se a composição média dos resíduos de serviço de saúde a reação de combustão fica:



Resolvendo algebricamente, chega-se a:  $y = 1,613\beta + 6,089$ ;  $z = 2,930\beta + 11,621$  e  $\chi = 1,703\beta + 11,854$ . Como na reação de combustão com excesso de ar genérico não se pode obter as condições ideais, deve-se utilizar um excesso de ar, definido como α. Logo a equação (1) fica na forma:



## 4. Temperatura Média no Incinerador

A temperatura dos gases de combustão será calculada em função das variáveis β e α. De acordo com Bonner et al. (1981), aceita-se como restrição o fato de que 5% do calor gerado é transferido para o exterior da câmara através da parede. Neste sentido, pode-se determinar a temperatura de chama através do balanço energético, a partir de:

$$\Delta H = \int_{T_i}^{T_f} \left[ \sum_i n_i C_{p_i} \right] dT + \Delta H_1 \quad (3)$$

sendo: ΔH o calor de combustão do combustível auxiliar e do resíduo; ni o número de moles de cada um dos componentes gasosos dos produtos de combustão (i = CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O, O<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>); Cp<sub>i</sub> o calor específico a pressão constante de cada componente gasoso; T<sub>i</sub> a temperatura inicial dos reagentes (T<sub>i</sub> = 25°C ou 298 K); T<sub>f</sub> a temperatura dos gases de combustão (a ser calculada); ΔH<sub>1</sub> o calor latente de vaporização da água a 25°C (2.440 kJ/kg).

### 5. Resultados e discussão

Os resultados obtidos e apresentados em tabelas relacionam os diferentes parâmetros apresentados anteriormente  $\alpha$ ,  $\beta$  e T permitindo, desta forma, a determinação dos requisitos de vazão de combustível auxiliar, vazões de ar e de combustão e volume da câmara. A Tabela 1 mostra valores de  $T_f$  (K) em função de  $\alpha$  e  $\beta$ . Conforme pode ser observado, como o excesso de ar para este tipo de incinerador varia entre 50 a 250%, os melhores valores para  $\beta$  e  $\alpha$  da Tabela 1 foram 8 e 2,1 respectivamente. Isto se justifica pelo critério econômico, pois quanto maior o valor de  $\beta$ , menor será a quantidade de combustível auxiliar utilizada.

Tabela 1 – Temperatura média no incinerador (em K) como função do excesso de ar normalizado,  $\alpha$ , e da razão entre as vazões de resíduo e combustível auxiliar,  $\beta$ .

$\alpha \downarrow$	$\beta$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,0	2166	2107	2061	2025	1996	1972	1951	1934	1919	1906
1,1	2051	1998	1957	1924	1897	1875	1857	1841	1827	1815
1,2	1949	1900	1863	1833	1809	1789	1772	1757	1745	1734
1,3	1857	1813	1779	1752	1730	1711	1696	1682	1671	1660
1,4	1775	1735	1703	1678	1658	1641	1626	1614	1603	1594
1,5	1701	1663	1634	1611	1592	1577	1563	1552	1542	1533
1,6	1633	1599	1572	1550	1533	1518	1506	1495	1486	1478
1,7	1572	1540	1515	1495	1478	1465	1453	1443	1435	1427
1,8	1516	1486	1462	1444	1429	1416	1405	1396	1388	1380
1,9	1464	1436	1414	1397	1383	1371	1360	1352	1344	1337
2,0	1417	1391	1370	1354	1340	1329	1319	1311	1304	1298
2,1	1373	1348	1329	1314	1301	1290	1281	1273	1267	1261
2,2	1332	1309	1291	1276	1264	1254	1246	1238	1232	1226
2,3	1295	1273	1256	1242	1230	1221	1213	1206	1200	1194
2,4	1260	1239	1223	1210	1199	1190	1182	1175	1170	1165
2,5	1227	1208	1192	1180	1169	1161	1153	1147	1141	1137

#### 5.1 Variação do PCI do resíduo

Neste estudo, houve a preocupação em avaliar uma possível variação no PCI do resíduo mantendo-se constante a taxa de alimentação. Foram montadas tabelas, na qual variou-se o PCI do resíduo em 25%, 50% e 75% para, dessa forma, determinar quais os melhores valores para  $\beta$ ,  $\alpha$  e temperatura no projeto da câmara primária. Para esse estudo a temperatura de trabalho na câmara é considerada da ordem de 1000°C.

As Tabelas 2, 3 e 4 mostram os valores da temperatura média no incinerador em função de  $\alpha$  e  $\beta$ . quando há uma redução no PCI do resíduo de 75%, 50% e 25%, respectivamente.

Os resultados mostrados nas Tabelas 2, 3 e 4 mostram que caso haja uma redução de até 25% no PCI do resíduo com no mínimo 50% de excesso de ar, como indicado na Tabela 2, a temperatura do processo manter-se-á numa faixa de 1136°C (1409 K) garantindo ainda, a temperatura do projeto e a completa destruição do resíduo. Para uma redução de 50% no valor do PCI, Tabela 3, os valores de  $\beta$  e  $\alpha$  foram de 7 e 1,5 com uma temperatura de 1013 °C (1286 K) o que garante ainda o patamar de temperatura desejado. Para uma redução de 75% no valor do PCI, Tabela 4, os valores de  $\beta$  e  $\alpha$  foram de 4 e 1,5 com uma temperatura de 1031°C (1304 K), ou seja, para se manter a temperatura do projeto terá que ser consumida uma quantidade maior de combustível auxiliar.

Tabela 2 - Temperatura média no incinerador (K) com PCI reduzido de 25%.

$\alpha \downarrow$	$\beta$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,0	2122	2022	1958	1901	1854	1816	1783	1755	1731	1710
1,1	2009	1918	1858	1805	1762	1727	1696	1670	1648	1628
1,2	1909	1825	1769	1720	1680	1647	1619	1595	1574	1555
1,3	1819	1741	1689	1644	1606	1575	1549	1526	1507	1490
1,4	1738	1666	1617	1575	1540	1511	1486	1465	1446	1430
1,5	1666	1598	1552	1512	1479	1452	1429	1409	1391	1376
1,6	1600	1536	1493	1455	1424	1398	1377	1358	1341	1327
1,7	1539	1480	1439	1403	1374	1350	1329	1311	1296	1282
1,8	1485	1428	1389	1356	1328	1305	1285	1268	1254	1241
1,9	1434	1381	1344	1312	1286	1264	1245	1229	1215	1203
2,0	1388	1338	1302	1272	1247	1226	1208	1193	1179	1168
2,1	1345	1297	1264	1235	1211	1191	1174	1159	1146	1135
2,2	1306	1260	1228	1200	1177	1158	1142	1128	1116	1105
2,3	1269	1226	1195	1168	1146	1128	1112	1099	1087	1077
2,4	1235	1193	1164	1138	1117	1100	1085	1072	1061	1051
2,5	1203	1163	1135	1110	1090	1073	1059	1047	1036	1026

Tabela 3 - Temperatura média no incinerador (em K) com PCI reduzido de 50%.

$\alpha \downarrow$	$\beta$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,0	2077	1951	1852	1773	1709	1655	1609	1570	1536	1506
1,1	1962	1843	1751	1677	1617	1567	1524	1487	1455	1428
1,2	1864	1754	1668	1599	1542	1495	1455	1420	1390	1364
1,3	1777	1673	1593	1528	1475	1430	1393	1360	1332	1308
1,4	1699	1601	1525	1464	1414	1372	1337	1306	1280	1256
1,5	1628	1536	1464	1407	1359	1320	1286	1257	1232	1210
1,6	1563	1477	1409	1354	1310	1272	1240	1213	1189	1168
1,7	1505	1423	1359	1307	1264	1228	1198	1172	1150	1130
1,8	1452	1374	1312	1263	1223	1189	1160	1135	1113	1094
1,9	1403	1328	1270	1223	1184	1152	1124	1101	1080	1062
2,0	1358	1287	1231	1186	1149	1118	1092	1069	1049	1032
2,1	1316	1248	1195	1152	1117	1087	1062	1040	1021	1005
2,2	1278	1213	1162	1121	1087	1058	1034	1013	995	979
2,3	1242	1180	1131	1091	1059	1031	1008	988	970	955
2,4	1209	1149	1102	1064	1033	1006	984	964	948	933
2,5	1178	1120	1075	1038	1008	983	961	943	926	912

Tabela 4 - Temperatura média no incinerador (em K) com PCI reduzido de 75%.

$\alpha \downarrow$	$\beta$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,0	2032	1871	1738	1643	1552	1489	1429	1377	1333	1294
1,1	1920	1768	1649	1554	1476	1410	1354	1306	1264	1228
1,2	1824	1682	1571	1481	1407	1346	1293	1248	1209	1175
1,3	1738	1605	1500	1416	1346	1288	1239	1196	1159	1127
1,4	1662	1536	1437	1357	1292	1237	1190	1150	1115	1084
1,5	1592	1473	1380	1304	1242	1190	1146	1108	1075	1045
1,6	1530	1417	1328	1256	1197	1148	1106	1070	1038	1010
1,7	1473	1365	1281	1213	1157	1110	1069	1035	1005	978
1,8	1420	1318	1238	1173	1119	1074	1036	1003	974	949
1,9	1373	1275	1198	1136	1085	1042	1006	974	947	922
2,0	1329	1236	1162	1103	1054	1012	977	947	921	898
2,1	1288	1199	1129	1072	1025	985	951	922	897	875
2,2	1251	1165	1098	1043	998	960	927	899	875	854
2,3	1216	1134	1069	1016	973	936	905	878	855	834
2,4	1184	1114	1042	991	949	914	884	858	836	816
2,5	1154	1077	1017	968	928	894	865	840	818	799

## 5.2. Tempo de Residência

Um parâmetro fundamental para o projeto é o tempo de residência médio dos gases dentro do incinerador, levando-se em conta que as diversas reações químicas necessitam de tempo hábil para sua conclusão. O valor médio deste parâmetro é:

$$t_R = \int \frac{dV}{\phi} \quad (4)$$

Considerando o comportamento dos gases de combustão próximo ao de um gás perfeito, temos a relação  $t_R/V$ :

$$\frac{t_R}{V} = \frac{(69,39\beta + 233,03\beta\alpha + 1626,84\alpha + 97,88) \cdot 1000}{[2,85\beta + (8,08\beta + 56,41) \cdot \alpha \cdot 5,86] (0,08026) \cdot T_f \cdot 27,78 \cdot \left(1 + \frac{1}{\beta} + \frac{233,78\beta + 1627,32}{100 \cdot \beta}\right) \alpha} \quad (5)$$

Com os dados da Tabela 1, obtêm-se os valores de  $t_R/V$  em função de  $\alpha$  e  $\beta$ . Os resultados são apresentados na Tabela 5. Para o cálculo da câmara primária serão adotados, de acordo com a Tabela 1, os valores de  $\beta = 8$  e  $\alpha = 2,1$  que correspondem a uma temperatura de 1273 K (1000°C). Como  $t_R = 2$  s e  $t_R/V = 0,85$  s/m<sup>3</sup>, temos que o volume da câmara é igual a 2,35 m<sup>3</sup>. Uma relação de aspecto L/D entre 2,5 e 4,0 é razoável para uma câmara de incineração (BONNER et al., 1981). Com  $V = 2,35$  m<sup>3</sup> e  $D = 0,95$  m, temos  $L = 3,32$  m, o que dá uma relação L/D = 3,5.

Tabela 5 – Valores de  $t_R/V$  (s/m<sup>3</sup>) em função do excesso de ar normalizado,  $\alpha$ , e da razão entre as vazões de resíduo e combustível auxiliar,  $\beta$ .

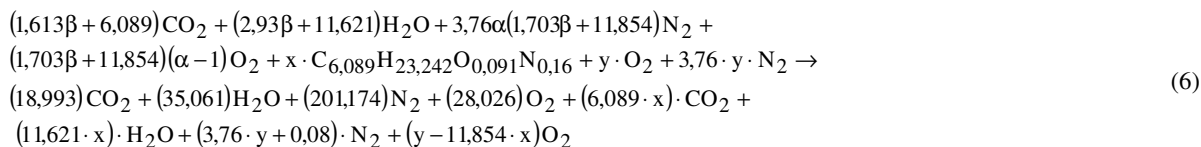
$\alpha \downarrow$	$\beta$									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1,0	0,42	0,72	0,95	1,12	1,27	1,39	1,48	1,57	1,64	1,70
1,1	0,38	0,66	0,87	1,04	1,18	1,29	1,38	1,46	1,52	1,58
1,2	0,36	0,62	0,81	0,97	1,09	1,20	1,29	1,36	1,42	1,48
1,3	0,33	0,57	0,76	0,91	1,03	1,12	1,21	1,28	1,34	1,39
1,4	0,31	0,54	0,71	0,85	0,96	1,06	1,13	1,20	1,26	1,31
1,5	0,29	0,51	0,67	0,80	0,91	1,00	1,07	1,13	1,19	1,24
1,6	0,27	0,48	0,63	0,76	0,86	0,94	1,01	1,08	1,13	1,17
1,7	0,26	0,45	0,60	0,72	0,82	0,90	0,96	1,02	1,07	1,12
1,8	0,25	0,43	0,57	0,68	0,78	0,85	0,92	0,97	1,02	1,06
1,9	0,23	0,41	0,55	0,65	0,74	0,81	0,88	0,93	0,98	1,02
2,0	0,22	0,39	0,52	0,62	0,71	0,78	0,84	0,89	0,93	0,97
2,1	0,21	0,37	0,50	0,60	0,68	0,75	0,80	0,85	0,89	0,93
2,2	0,20	0,36	0,48	0,57	0,65	0,72	0,77	0,82	0,86	0,89
2,3	0,20	0,34	0,46	0,55	0,63	0,69	0,74	0,79	0,83	0,86
2,4	0,19	0,33	0,44	0,53	0,60	0,66	0,71	0,76	0,80	0,83
2,5	0,18	0,32	0,42	0,51	0,58	0,64	0,69	0,73	0,77	0,80

### 5.3. Verificação do Regime de Escoamento

De acordo com Bonner et al. (1981) é recomendado que o regime de escoamento no interior da câmara seja turbulento, com número de Reynolds, Re, superior a 5000. O valor encontrado foi de 7.588, o que atende ao desejado.

### 5.4. Cálculo da Câmara de Pós Combustão

Observando os produtos da reação da equação 2 e adicionando-se gás natural na câmara de pós-combustão tem-se:



Na equação do balanço de energia [equação (3)], com a temperatura de 1473 K introduzindo o valor de  $\Delta H$  do gás natural e efetuando as integrações, tem-se:

$$\begin{aligned}
 1.138,625 \cdot x \cdot 0,95 \cdot 1000 = &\int_{1273}^{1473} [(18,993) \cdot (10,34 + 0,00274T - 195,500T^{-2}) + \\
 &+ (35,061) \cdot (8,22 + 0,00015T + 0,00000134T^2) + (28,026) \cdot (8,27 + 0,000258T + 187700T^{-2}) + \\
 &+ (201,174) \cdot (6,5 + 0,001T)] dT + \int_{298}^{1473} [(6,089 \cdot x) \cdot (10,34 + 0,00274T - 195,500T^{-2}) + \\
 &+ (1,621 \cdot x) \cdot (8,22 + 0,00015T + 0,00000134T^2) + (y - 11,854 \cdot x) \cdot (8,27 + 0,000258T + 187700T^{-2}) \\
 &+ (3,76 \cdot y + 0,08) \cdot (6,5 + 0,001T)] dT
 \end{aligned} \tag{7}$$

ou seja,

$$975.437,85 \cdot x = 495.246,46 + 42.112,39 \cdot y \tag{8}$$

Neste ponto será levantada a hipótese da possibilidade de que o excesso de ar advindo da câmara primária seja suficiente para o processo de pós-combustão, isto é,  $y = 0$ , do que obtém-se  $x = 0,508$ .

Segundo CETESB (Resolução de Diretoria nº 007/97/D de 06/02/97), a concentração de oxigênio em base seca na chaminé deve estar acima ou igual a 7%, isto garante que o processo de oxidação nas câmaras foi adequado.

De acordo com Carvalho e McQuay (2001), a concentração volumétrica em termos de fração molar de cada um dos gases de combustão é a relação entre o número de mols de cada um deles e a soma dos números de mols de todos os produtos, exceto a água. Desta forma, a concentração de oxigênio nos produtos de combustão na saída da câmara de pós-combustão é dada pela equação:

$$\%O_{2,BS} = \frac{28,3 + y - 11,854 \cdot x}{248,29 - 5,765 \cdot x + 4,76 \cdot y} \cdot (100) \quad (9)$$

A Tabela 6 mostra a variação da concentração de oxigênio nos gases de combustão na saída da câmara de pós-combustão.

Tabela 6 – Percentagem de oxigênio na saída da câmara de pós-combustão

y	x	%O <sub>2</sub> BS
0,00	0,508	8,97
0,50	0,529	8,99
1,00	0,551	9,01
1,50	0,572	9,02
2,00	0,594	9,04
2,50	0,616	9,05
3,00	0,637	9,07
3,50	0,659	9,08
4,00	0,680	9,10
4,50	0,702	9,11
5,00	0,724	9,13

Pode-se observar que quando o valor de y é zero a percentagem de oxigênio em base seca é 8,9%, o que atende ao desejado e confirma a hipótese sugerida.

Para o cálculo das dimensões da câmara de pós-combustão, deve-se calcular o  $m_{tot}$  vindo da câmara primária menos as cinzas, somando-se o gás natural introduzido na câmara de pós-combustão ou secundária:

$$\dot{m}_{GN,cp} + \dot{m}_{res} - \dot{m}_{cinzas} + \dot{m}_{GN,cs} \quad (10)$$

Substituindo os valores para  $\beta = 8$ ,  $\alpha = 2,1$  e  $\dot{m}_{res} = 27,78 \frac{g}{s}$  na equação 4, tem-se:

$$\frac{t_R}{V} = \frac{(1) \cdot (28,104) \cdot (1000)}{(0,08206) \cdot (1473) \cdot (279,67)} = 0,83 \frac{s}{m^3} \quad (11)$$

Para um tempo de residência igual a 2 segundos, e uma relação de aspecto L/D = 3,6 temos V = 2,41 m<sup>3</sup> com um comprimento L = 3,40 m e um diâmetro D = 0,95 m, sendo o Re = 6811.

## 6. Conclusões

O crescimento populacional pode ser encarado como uma preocupação constante para os governos quando observado do ponto de vista da qualidade de vida. Quanto menor a qualidade de vida, mais problemas relacionados à saúde emergem, aumentando assim a possibilidade de que tais resíduos possam de alguma forma trazer problemas fito-sanitários à população caso não sejam tratados adequadamente.

Embora a incineração constitua hoje um recurso largamente empregado no tratamento de resíduos, tendo em vista a alta eficiência de destruição e aplicabilidade para um grande espectro de produtos terminais, a consciência pública é hoje um severo censor para as questões de meio ambiente. Tal fato exige que o projeto de um incinerador seja o resultado de uma criteriosa atividade de engenharia que garanta máxima eficiência e mínima interferência com os mecanismos ecológicos.

A caracterização físico-química do RSS é de extrema importância, pois determinará diversos parâmetros no projeto do incinerador. A escala de importância na composição química de um resíduo geralmente é maior para lodos e resíduos sólidos do que para líquidos, e muito maior em relação aos gases. Tal afirmação vem normalmente da fração de



constituintes inorgânicos incombustíveis nos resíduos sólidos que tem relativa importância sobre o sistema de incineração. A presença de elementos tóxicos e compostos também é importante na análise do impacto sobre a segurança do operador, na eficiência do sistema de combustão requerido e no controle da poluição e/ou projeto da unidade como uma incineração de resíduos perigosos. A variação da composição físico-química dos RSS ocorre de acordo com a fonte geradora. A toxicidade do resíduo produzido em cada departamento ou serviço depende da natureza da terapêutica especializada bem como dos procedimentos adotados em cada hospital.

Neste trabalho executou-se cálculos para dimensionamento das câmaras primária e secundária de um incinerador tipo rotativo, partindo da análise da composição do resíduo de serviço de saúde do hospital Frei Galvão do município de Guaratinguetá e do combustível auxiliar, neste caso, gás natural.

Segundo Lee e Huffman (1996), o poder calorífico necessário para sustentar uma combustão está em torno de 11.721 kJ/kg ou mais. Os resíduos de serviço de saúde utilizados no estudo apresentaram um poder calorífico da ordem de 6.390,35 kJ/kg, que por si só não sustentam a combustão porém, com o auxílio de outro combustível (gás natural) foram suficientes para a obtenção da temperatura de projeto (1000 °C). Esta temperatura foi obtida com uma relação entre a vazão mássica do resíduo e a vazão mássica do combustível auxiliar ( $\beta$ ) de 8 e excesso de ar ( $\alpha$ ) de 2,1. Além disso, houve a preocupação em avaliar uma possível variação no PCI do resíduo mantendo-se constante a taxa de alimentação. Foram montadas tabelas, na qual variou-se o PCI do resíduo em 25%, 50% e 75% para a determinação dos melhores valores para  $\beta$ ,  $\alpha$  e temperatura no projeto das câmaras primária e secundária. Com uma redução de 25% no PCI do resíduo com no mínimo 50% de excesso de ar, a temperatura do processo manteve-se numa faixa de 1136°C garantindo a temperatura do projeto e a completa destruição do resíduo. Para uma redução de 50% no valor do PCI, os valores de  $\beta$  e  $\alpha$  foram de 7 e 1,5 com uma temperatura de 1013°C garantindo ainda o patamar de temperatura desejado. Para uma redução de 75% no valor do PCI, os valores de  $\beta$  e  $\alpha$  foram de 4 e 1,5 com uma temperatura de 1031°C, ou seja, para se manter a temperatura do projeto terá ser consumido uma quantidade maior de combustível auxiliar, o que aumenta o custo do processo.

No projeto da câmara primária, com um tempo de residência de 2 segundos, o comprimento, volume e diâmetro da câmara foram respectivamente 3,32 m, 2,35 m<sup>3</sup> e 0,95 m sendo que o valor do diâmetro foi selecionado através de sua disponibilidade comercial e da manutenção de desejável regime de escoamento (calculado através do número de Reynolds). Caso o número de Reynolds fique abaixo de 5.000 deve-se reduzir o diâmetro e recalculando o número de Reynolds. Neste trabalho o valor do número de Reynolds foi de 7.588 para o diâmetro selecionado.

Para o projeto da câmara secundária (pós-queima) foi determinada uma temperatura de operação de 1200°C, mantendo-se  $\beta = 8$  e  $\alpha = 2,1$ . A partir deste ponto avaliou-se a possibilidade de que o excesso de ar advindo da câmara primária fosse suficiente para atender a completa oxidação dos gases na câmara secundária, o que foi confirmado através do cálculo de percentagem de O<sub>2</sub> em base seca, cujo o índice calculado foi de 8,97%. Esta característica atende à exigência da legislação da CETESB, que estabelece um índice mínimo de O<sub>2</sub> em base seca de 7%. Recalculando a vazão mássica de produtos da combustão oriundos da câmara primária e utilizando um tempo de residência igual a 2 segundos, foram determinadas as dimensões da câmara secundária com comprimento aproximadamente igual a 3,4 m, diâmetro igual a 0,95 m, perfazendo um volume de aproximadamente 2,4 m<sup>3</sup>. O número de Reynolds calculado desta câmara foi de 6.811.

## **7. Referências Bibliográficas**

- Carvalho, J. A.; McQuay, M.Q., 2001, Princípios de combustão: aplicações em processos de engenharia, Apostila do Curso de Processos e Equipamentos de Combustão, Pós Graduação em Engenharia Mecânica, UNESP, Campus de Guaratinguetá.
- Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB), 1999, Legislação Estadual: controle da poluição ambiental. São Paulo: Série Documentos, 498p.
- Bonner, T.A.; Cornett, C.L.; Desai, B.O.; Fullerkamp, J.M.; Hughes, T.W.; Johnson, M.L.; Kennedy, E.D.; McCormick, R.J.; Peters, J.A.; Zanders, D.L., 1981, Engineering Handbook of Hazardous Waste Incineration, Chapter 2, Monsanto Research Corporation, Dayton, OH.
- Dempsey, C.R.; Oppelt, E. T., 1993, Incineration of hazardous waste, a critical review update, Journal of the Air and Waste Management Association, Vol 43(1), pp. 25-73.
- LEE, C. C.; HUFFMAN, G. L., 1996, Medical waste management/incineration. Journal of Hazardous Materials, Vol. 48, pp. 1-30.

Lora, E. E. S., 2000, Prevenção e Controle da Poluição nos Setores Energético, Industrial e de Transporte. 1. Ed. Aneel, Brasília, Brasil, 503p.

Incineração. e-meioambiente, Resíduos sólidos. Disponível em: [http://www.e-meioambiente.com.br/r\\_inciner.htm](http://www.e-meioambiente.com.br/r_inciner.htm). Acesso em: 26 fev. 2003.

Moreira, V. P. Caracterização dos resíduos de serviços de saúde no município de Bauru. 1995. 125f. Dissertação (Mestrado em Projeto, Arte e Sociedade – Área de Concentração em Planejamento Urbano e Regional: Assentamentos Humanos) – Faculdade Engenharia do Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru.

Silva, C. L. Incineração de resíduos sólidos de serviços de saúde com proposta de utilização de biogás. 1998. 140f. Tese (Livre-Docência em Engenharia Mecânica) – Faculdade Engenharia do Campus de Bauru, Universidade Estadual Paulista, Bauru.

Wark Jr, K., Richards, D. E., 1999, Thermodynamics. 6 th. Boston, USA, 1156 p

## PROJECT OF A ROTARY KILN INCINERATOR FOR MEDICAL WASTES

### **Amauri Menezes Leal Júnior**

Universidade Estadual Paulista, Campus de Guaratinguetá  
Av Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333, Guaratinguetá, SP CEP:12516-410 C.P. 205  
amaurileal@yahoo.com.br

### **João Andrade de Carvalho Júnior**

Universidade Estadual Paulista - Campus de Guaratinguetá  
Av Dr. Ariberto Pereira da Cunha, 333 – Guaratinguetá - CEP:12516-410 - .C.P. 205 – SP  
joão@feg.unesp.br

**Abstract:** *The population growth represents a continuing concern for the governments when it is observed in the quality of life viewpoint. Many sanitary problems are initiated by the inadequate destination of the residues, whose danger is evident because of the associated chemical and pathogenic elements. This paper presents a methodology for the sizing of the primary and secondary combustion chamber of a rotary kiln incinerator for medical wastes. This methodology was carried out using the mass and energy balance of the incinerator, which is capable to process 100 kg/h of residues, using natural gas as the auxiliary fuel. The study was executed using the medical wastes composition data of Frei Galvão Hospital (Guaratinguetá, SP, Brazil), that has 150 streambeds. It had been considered, for the primary and secondary combustion chamber, the temperatures of 1000°C and 1200°C and the residence time of 2 seconds, respectively. Next, the behavior of the temperature, the ratio between waste mass flow and fuel mass flow, and the oxidant excess inside the primary chamber, were analysed considering the variation of the waste humidity. It was concluded that the medical wastes had not presented a lower heat value capable to support the combustion being necessary the aid of another fuel (natural gas). Thus, with the ratio between the mass flow of the wastes and the mass flow of the auxiliary fuel ( $\beta$ ) of 8 and air excess ( $\alpha$ ) of 2, the temperature of the project was kept. For the project of the primary chamber, the length, volume and diameter was 3,32 m, 2,35 m<sup>3</sup> and 0,95 m, respectively. For the project of the secondary chamber, the length of about 3,4 m, the diameter of 0,95 m, and the volume of about 2,4 m<sup>3</sup> was determined.*

**Keywords:** *Incinerator, medical waste, waste composition, energy and mass balance, combustion.*