



DIMENSIONAMENTO E PROJETO DO SISTEMA DE CAPTAÇÃO DE BIOGÁS EM ATERROS SANITÁRIOS

Arieli Couto (arielicouto@gmail.com)
Universidade do vale do rio dos sinos – Unisinos

RESUMO

Com a origem das áreas urbanas surge a problemática da disposição dos seus resíduos, neste contexto desenvolveu-se o aterro sanitário, método de tratamento e acomodação final dos resíduos sólidos urbanos de forma sanitariamente segura à saúde da população e ao meio ambiente. Contudo, o aterro sanitário concebe dois subprodutos, o lixiviado e o biogás. O biogás é um gás que pode ser utilizado em substituição dos combustíveis fósseis, mas para este fim é necessário captá-lo do aterro sanitário e transmiti-lo até seu local de tratamento.

O presente trabalho configura o projeto e dimensionamento do sistema de captação do gás de aterro, utilizando como subsídio a geração de biogás do aterro sanitário Rincão das Flores, localizado em Caxias do Sul, Rio Grande do Sul. Resultando no projeto e dimensionamento de 60 poços de captação e cinco trechos de tubulação, dimensionadas conforme a vazão de biogás decorrente em cada segmento. Deste modo, os trechos A1 e A2 possuem o diâmetro de 50 mm. O trecho B o diâmetro de 75 mm, enquanto o trecho C foi estabelecido com diâmetro de 225 mm e o trecho D de 315 mm.

Pertinente ao pré-tratamento, foi proposto a remoção de condensados constituído de dez condensadores.

PALAVRAS-CHAVE: aterro sanitário, biogás, captação.

INTRODUÇÃO

A revolução industrial despertou o desejo de objetos de consumo na sociedade, originando a produção em grande escala, o que ampliou consideravelmente o número e a diversidade dos resíduos gerados nas áreas urbanas. (CAVINATTO; RODRIGUES, 2010). O acúmulo desses resíduos tornou-se um problema com o surgimento das grandes regiões metropolitanas, pois há manifestações de doenças em decorrência de seus vetores e geração de áreas inóspitas devido a deposição inadequada dos mesmos. (ALCÂNTARA, 2007).

Desde então, faz-se necessário desenvolver técnicas cada vez mais confiáveis para o manejo dos Resíduos Sólidos Urbanos (RSU). (LIMA, 2004). Na atualidade, a técnica de utilizar o Aterro Sanitário (AS) como destino final dos RSU está se expandindo devido ao seu baixo custo e a sua relativa simplicidade de execução. (ALCÂNTARA, 2007).

Entretanto, o AS emite dois subprodutos da decomposição dos resíduos sólidos em um ambiente anaeróbico, que são o lixiviado e o biogás. O biogás é uma mistura de gases constituído essencialmente de dióxido de carbono e metano em proporções variadas, conforme a composição do substrato confinado no AS. (LIMA, 2004). Como apresenta a Tabela 1.

Tabela 1 - Composição média do biogás

COMPONENTE	COMPOSIÇÃO
Metano (CH ₄)	50% - 75% em vol.
Dióxido de carbono (CO ₂)	25% - 45% em vol.
Água (H ₂ O)	2% - 7% em vol.
Sulfeto de hidrogênio (H ₂ S)	20 – 20.000 ppm
Nitrogênio (N ₂)	< 2% em vol.
Oxigênio (O ₂)	< 2% em vol.
Hidrogênio (H ₂)	< 2% em vol.

Fonte: PROBIOGÁS (2010)



Isto é, cada biogás possui um potencial energético diferente, que varia conforme a porcentagem de metano na sua composição, ou seja, quanto maior a quantidade de metano maior o seu poder calorífico. (MAGALHÃES, 1986). Segundo Pereira (2010, p. 155), um metro cúbico de biogás equivale energeticamente a aproximadamente:

- 1,5 m³ de gás de cozinha (GLP);
- 0,52 a 0,6 litros de gasolina;
- 0,9 litros de álcool combustível;
- 1,43 kWh de eletricidade;
- 2,7 kg de lenha (madeira queimada).

A produção de biogás no interior do AS representa um problema para a gestão de resíduos em geral. No entanto, simultaneamente, configura um enorme potencial de crescimento do setor de utilização do gás de aterro, pois se o biogás for capturado e utilizado em substituição dos combustíveis fósseis, além de representar uma fonte de energia, a emissão de carbono decorrente dessa queima já pertencia ao ciclo natural da atmosfera atual, ao contrário dos combustíveis fósseis que emitem o carbono retido a milhares de anos no interior da crosta terrestre. Diminuindo assim, a emissão de gases poluentes. (KARLSSON, 2014).

OBJETIVO

Propor um sistema de captação do biogás gerado no aterro sanitário Rincão das Flores, visando uma posterior aplicação como fonte de energia.

METODOLOGIA

O AS utilizado para realizar o presente estudo de caso foi o Rincão das Flores, localizado em Caxias do Sul, Rio Grande do Sul. Com base na sua área superficial de 275 hectares, sua profundidade de 4 metros e na estimativa de geração de biogás durante o período de operação e monitoramento, demonstrado na Figura 1, foi possível realizar o projeto e o dimensionamento do sistema de captação do gás de aterro.

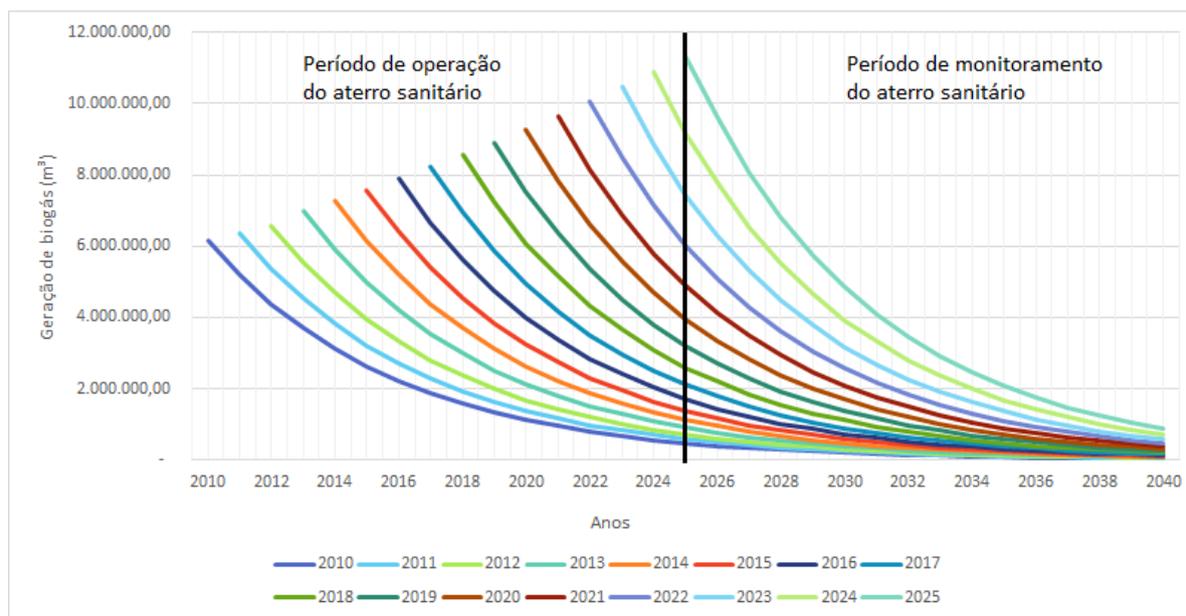


Figura 1 - Curva de geração de biogás (m³/ano)

Fonte: POSTALI (2014)

EXTRAÇÃO

O principal fundamento utilizado para calcular o dimensionamento e a disposição dos drenos de extração é o raio de abrangência, que é a área que cada dreno tende a suprir. O raio de influência adotado deve ser estabelecido entre 45 e 67 metros. E para tal, é necessário considerar a tipologia da cobertura do AS (impermeável ou permeável),



profundidade do mesmo, idade e composição dos RSU retidos. Isto é, quanto maior a densidade dos resíduos orgânicos no interior do AS, menor deve ser o raio de abrangência adotado. (BAGCHI, 2004).

Para efetuar o dimensionamento do raio de abrangência admitindo-se a utilização de uma sobreposição teórica de 27%, a fim de triangular a superfície do AS, obtendo assim, 100% de abrangência. (BAGCHI, 2004). A Figura 2 demonstra graficamente esta sobreposição.

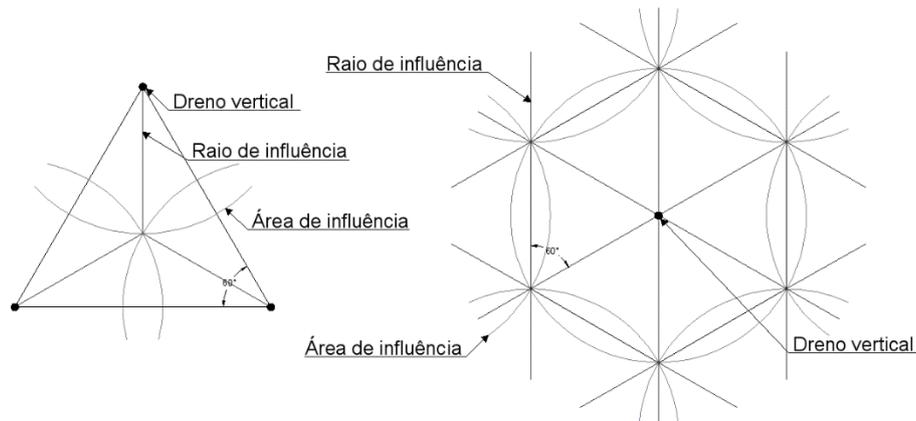


Figura 2 - Posição em que o dreno vertical compreende toda a superfície do aterro sanitário

Fonte: BAGCHI (2004)

Assim, o espaçamento das cavidades de extração é expresso pela Equação 1. (BAGCHI, 2004).

$$S = \left(2 - \frac{O_1}{100}\right) R \quad \text{equação (1)}$$

Onde:

S : espaçamento entre os drenos (m)

O1 : sobreposição das áreas de influencias (%)

R : raio de influência (m)

Após especificar o espaçamento dos poços de extração e iniciar o processo de disposição dos drenos no AS, foi perceptível que a área de abrangência de cada poço de coleta ao desconsiderar a metade da área de sobreposição se transformou na figura de um hexágono, como é expressado na Figura 3, seguida pela Equação 2.

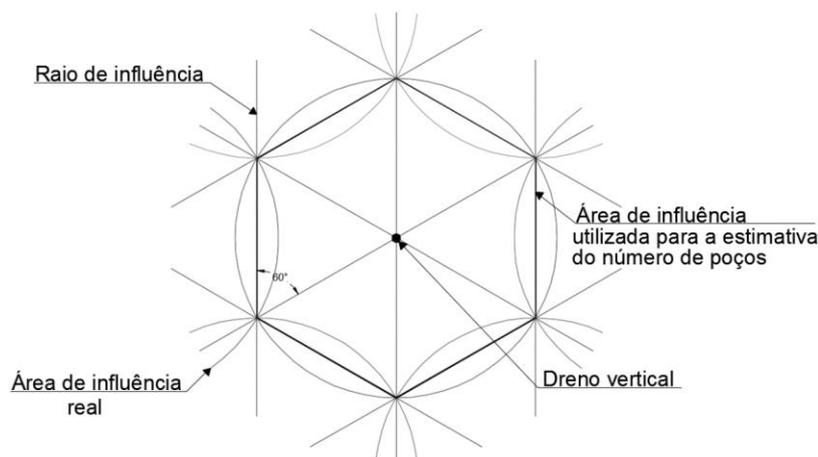


Figura 3 - Área de influência utilizada para a estimativa do número de poços de coleta

Fonte: AUTOR

$$A_w = \frac{3R^2\sqrt{3}}{2} \quad \text{equação (2)}$$



Onde:

A_w : área de abrangência do poço de coleta (m^2)

R : raio de influência (m)

Ao expressar graficamente a disposição dos drenos conforme supracitado e analisar inúmeras estruturas de aterros sanitários, alterando entre o quadrado e o retângulo, foi reconhecível um padrão na razão entre a área do AS e o número de poços, expresso pela Equação 3.

$$W = \frac{A_t}{A_w} 0,92$$

equação (3)

Onde:

W : número de poços de coleta (uni)

A_t : área do aterro sanitário (m^2)

A_w : área de abrangência do poço de coleta (m^2)

A Equação 3 é definida pela razão entre a área do AS pela área de influência dos drenos de coleta, multiplicada por 0,92 devido a área das laterais do AS quadrado ou retangular, que ao serem triangulados sofrem uma carência da influência dos drenos de captação de aproximadamente 8% da área total do AS, como demonstrado na Figura 1.

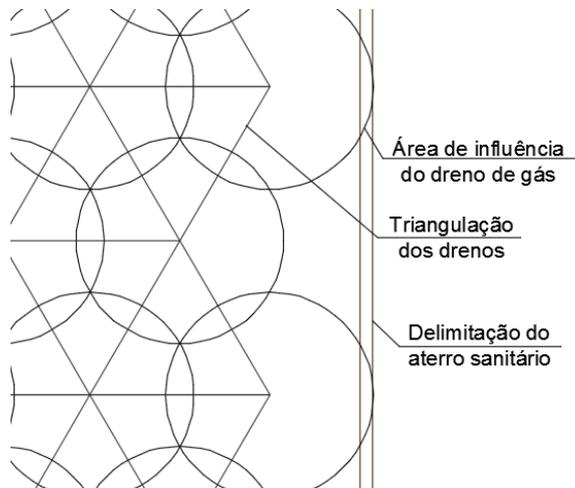


Figura 4 - Vista em planta da disposição dos drenos no AS

Fonte: AUTOR

TRANSPORTE

Foi utilizado como base para o dimensionamento a quantidade máxima de geração de biogás, que é 57.755.580,00 m^3 no ano de 2025. Em vista disso, segundo Bagchi (2004), a taxa de vazão (m^3/s), pode ser estimada com base na Equação 4, seguida pela Equação 5.

$$\frac{\text{Geração máxima anual de biogás}}{365} = \text{taxa de vazão diária } (m^3/\text{dia})$$

equação (4)

Onde:

365: média de dias contidos em um ano

$$\frac{\text{Taxa de vazão diária}}{86400} = \text{taxa de vazão em segundos } (m^3/s)$$

equação (5)

Onde:

86400: quantidade de segundo que compõe um dia



Com o resultado obtido, é viável computar a área da seção transversal da tubulação de biogás com a Equação 6. (JANNA, 2011).

$$A = \frac{Q}{V} \quad \text{equação (6)}$$

Onde:

A: área da seção transversal da tubulação (m²)

Q: taxa de vazão em segundos (m³/s)

V: velocidade de escoamento (m/s)

A seguir, em posse da área da seção transversal, é possível calcular o diâmetro interno da tubulação com a Equação 7.

$$D_i = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} \quad \text{equação (7)}$$

Onde:

D_i: diâmetro interno do tubo (m)

A: área da seção transversal da tubulação (m²)

Por conseguinte, é necessário verificar em qual regime de escoamento a tubulação de coleta de biogás irá trabalhar, se lamelar ou turbulento, que é definido pela quantidade adimensional expressa pela Equação 08 denominada de Número de Reynolds. (BAGCHI, 2004).

$$\text{Número de Reynolds} = \frac{D_i V \rho_g}{\mu_g} \quad \text{equação (8)}$$

Onde:

D_i: diâmetro interno do tubo (m)

V: velocidade de escoamento (m/s)

ρ_g: densidade do gás (kg/m³)

μ_g: viscosidade do gás (kg/m.s)

Quando o Número de Reynolds estiver abaixo de 2000, o regime é lamelar. Quando este estiver entre 2000 e 4000, o regime será instável. E consequentemente, quando o Número de Reynolds for superior a 4000 o regime será turbulento. (TELLES, 1994).

Sequencialmente, é essencial averiguar a perda de carga que o biogás irá sofrer ao longo do sistema de captação. Ou seja, é necessário estabelecer o fator de atrito e para este fim, foi utilizado a definição de Fanning que consiste na razão entre a tensão de cisalhamento na parede da tubulação e a energia cinética do escoamento, por unidade de volume. (GONÇALVES, 2008).

O cálculo para quantificar o fator de Fanning, é relacionado ao regime de escoamento. Isto é, quando o regime de escoamento for determinado como lamelar, será utilizado a Equação 9. (CARDOSO, 2008). Quando o regime de escoamento for especificado como instável ou turbulento, será empregado a Equação 10. (AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP), 2013).

$$f = \frac{64}{Re} \quad \text{equação (9)}$$

Onde:

f: fator de atrito

Re: número de Reynolds



$$\frac{1}{\sqrt{f}} = -2 \log_{10} \left(\frac{k}{3,7D_i} + \frac{2,51}{Re \sqrt{f}} \right)$$

equação (10)

Onde:

f: fator de atrito

k: rugosidade equivalente da parede do tubo (m)

Di: diâmetro interno do tubo (m)

Re: número de Reynolds

Em concordância com Dantas Neto e Souza (2014), a rugosidade das tubulações de polietileno, essencial para calcular o fator de atrito na Equação 10, é estimada em 0,002m.

Posteriormente, pode ser calculada a perda de carga que o biogás será submetido do poço de extração ao tratamento final. Tal perda de pressão é o somatório das perdas de carga que ocorrem ao longo da tubulação e nas conexões. (BAGCHI, 2004). De acordo com Janna (2011), a perda de pressão que sucede ao escoar o biogás pela tubulação é expressa pela Equação 11.

$$\Delta p_t = \frac{fL}{D_i} \frac{\rho_g V^2}{2}$$

equação (11)

Onde:

f: fator de atrito

L: extensão da tubulação (m)

Di: diâmetro interno do tubo (m)

ρ_g : densidade do gás (kg/m³)

V: velocidade (m/s)

A perda de carga decorrente de válvulas ou conexões, foi estipulada com a Equação 12. (BAGCHI, 2004).

$$\Delta p_c = \rho_g K \frac{V^2}{2g}$$

equação (12)

Onde:

ρ_g : densidade do gás (kg/m³)

K: coeficiente de atrito

V: velocidade (m/s)

g: aceleração da gravidade (m/s²)

O coeficiente de atrito das conexões e válvulas está discriminado na Tabela 2.

Tabela 2 - Valores de K correspondentes a determinadas conexões

DESCRIÇÃO	VALOR DE K
Curva de 45°	0,35
Curva de 90°	0,75
Te de derivação	1
Válvula ½ aberta	4,5

Fonte: Adaptado de Bagchi (2004)

É importante salientar que o valor da perda de pressão encontrado para cada item supracitado na Tabela 2 foi multiplicado pelo número de conexões do mesmo gênero apresentadas no projeto. Portanto, a perda de carga total foi conjecturada pela Equação 13.

$$\Delta p = \Delta p_t + \Delta p_c$$

equação (13)



Onde:

Δp : perda de carga total (N/m²)

Δp_t : perda de carga na tubulação (N/m²)

Δp_c : perda de carga nas conexões (N/m²)

SECAGEM

A secagem do biogás captado do aterro sanitário foi projetada considerando condensadores do tipo sifão, por se tratar de um elemento simples, de fácil manutenção e com um custo relativamente baixo. (EPA, [2016?]).

Em prol de estimar a distância adequada para a implantação dos condensadores, é importante conjecturar a quantidade de umidade que deve ser retida nos mesmos, utilizando a Equação 14. (FARQUHAR; MCBEAN; ROVERS, 1995).

$$h = \frac{P_v v}{CT} \quad \text{equação (14)}$$

Onde:

h: umidade retida (kg/mol)

P_v: pressão de equilíbrio (atm)

v: volume de biogás (m³)

C: constante

T: temperatura (°K)

SOPRADORES

A pressão requerida para succionar o biogás do interior do aterro sanitário é equivalente a perda de carga total na tubulação, uma vez que o biogás tende a ser menos denso que o ar atmosférico.

Consequentemente, a potência do soprador foi estimada pela Equação 15. (Bagchi, 2004).

$$P_s = \frac{P Q}{550} \quad \text{equação (15)}$$

Onde:

P_s: potência do soprador (W)

P: pressão requerida (N/m²)

Q: taxa de vazão em segundos (m³/s)

QUEIMADORES

Segundo Brito Filho (2005), há alguns elementos de extrema importância para a escolha dos queimadores a serem utilizados, esses elementos estão citados no Quadro 1.

Quadro 1 - Elementos de projeto importantes para a escolha dos queimadores

Dispositivos	Observações
Indicador e registrador de temperatura.	Utilizado para medir e registrar a temperatura do gás na chaminé do queimador. Quando o queimador está funcionando, deve ser mantida uma temperatura de 815°C ou mais na chaminé.
Sistema de reaquecimento do piloto automático.	Para assegurar um funcionamento contínuo.
Alarme de mau funcionamento com sistema automático de isolamento.	Utiliza-se o alarme e o sistema de isolamento para isolar o queimador de fornecimento de gás, interromper o ventilador e notificar a alguém responsável sobre a interrupção.



Pontos de inspeção.	Deve haver suficientes pontos de inspeção para permitir um reconhecimento visual da localização do sensor de temperatura dentro da chama.
---------------------	---

Fonte: BRITO FILHO (2005)

Além dos aspectos supracitados, é de extrema importância que o queimador mantenha o biogás retido no seu interior de 0,3 a 0,5 segundos a uma temperatura entre 815 e 900°C, pois este procedimento certifica que os contaminantes contidos no biogás sejam eliminados. (BAGCHI, 2004).

APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

EXTRAÇÃO

Aplicando a Equação 1 temos:

$$S = \left(2 - \frac{O_1}{100}\right) R = \left(2 - \frac{27}{100}\right) 65 = 112,45 \text{ m} \quad \text{equação (1)}$$

Para a especificação do distanciamento dos drenos de extração, foi adotado um raio de influência de 65 m, visto que a camada de RSU intrínseca no aterro sanitário possui apenas 4 m de altura.

Após a especificação do espaçamento entre os drenos, é necessário dimensionar a área de influência. E esta, está descrita pela Equação 2.

$$A_w = \frac{3R^2\sqrt{3}}{2} = \frac{3 \times 65^2\sqrt{3}}{2} = 10.976,87 \text{ m}^2 \quad \text{equação (2)}$$

Posterior a determinação da área de abrangência dos poços de extração, é possível calcular o número de poços necessários, utilizando a Equação 3 apresentada na metodologia.

$$W = \frac{A_t}{A_w} 0,92 = \frac{720.000}{10.976,87} 0,92 = 60,345 \quad \text{equação (3)}$$

O número de poços de coleta apresentado pela Equação 3 é uma estimativa, visto que ao dispor graficamente os drenos na área do aterro sanitário conforme a Figura 2, houve uma reorganização das áreas, modificando levemente o resultado para 60 poços. Esta reorganização é apresentada na Figura 5.

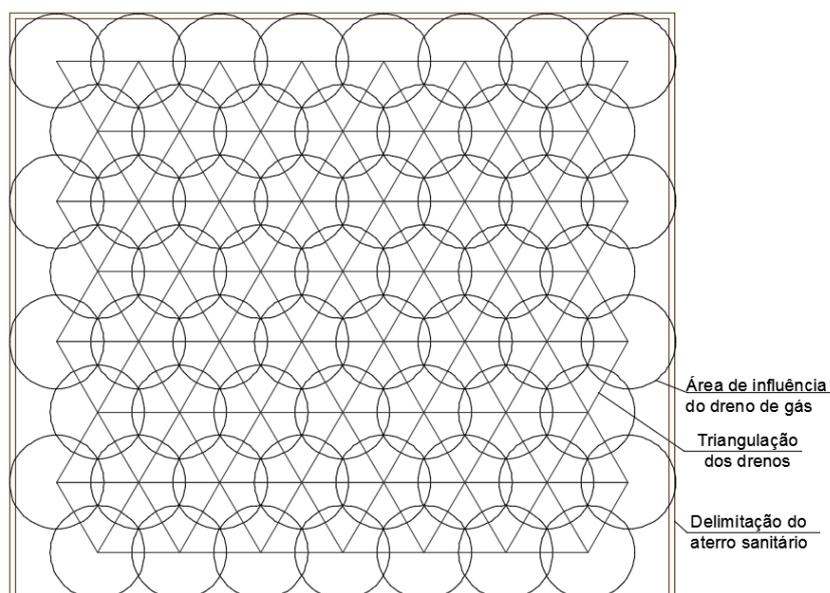


Figura 5 - Disposição dos drenos no AS

Fonte: AUTOR



TRANSPORTE

Primeiramente, foi necessário quantificar a vazão de biogás por segundo, utilizando a Equação 04 seguida da Equação 05.

$$\frac{\text{Geração máxima anual de biogás}}{365} = \frac{57.755.580,00}{365} = 158.234,465753 \text{ m}^3/\text{dia} \quad \text{equação (4)}$$

$$\frac{\text{Taxa de vazão diária}}{86400} = \frac{158.234,465753}{86400} = 1,83142 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{equação (5)}$$

Por conseguinte, foi fundamental subdividir a rede de transporte para dimensionar a tubulação referente a vazão disposta em cada elemento. Esta subdivisão pode ser apreciada na Figura 6.

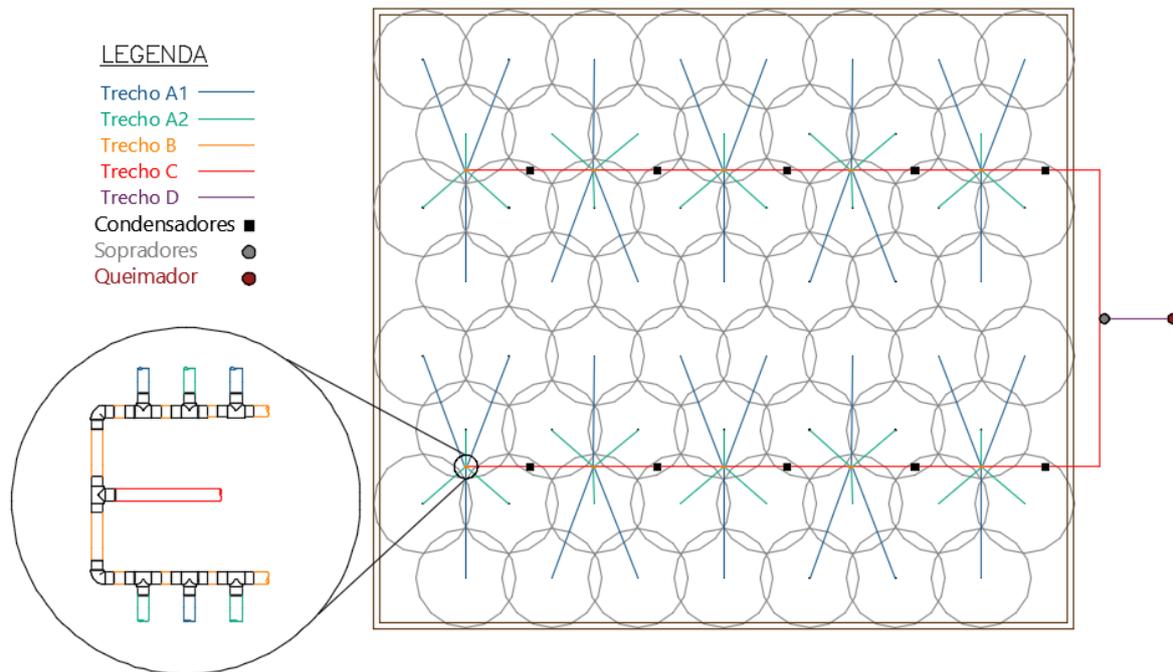


Figura 6 - Projeto do sistema de captação do biogás

Fonte: AUTOR

TRECHO A1

Para realizar o dimensionamento, primeiramente foi necessário quantificar a vazão que irá percorrer o trecho de tubulação A1. Para isso é fundamental dividir a vazão total por 60, visto que, o trecho estudado compreende o transporte do biogás captado de um único poço de coleta.

$$\frac{Q_{\text{total}}}{W_{\text{total}}} W_{\text{trecho}} = \frac{1,83142}{60} 1 = 0,030524 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{equação (16)}$$

Onde:

Q_{total} : taxa de vazão por segundo (m^3/s)

W_{total} : quantidade de poços de captação (uni)

W_{trecho} : quantidade de poços de captação contidos no trecho (uni)

Após a quantificação da vazão no trecho, foi estabelecida a sequencia de cálculo descrita na metodologia.

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{0,030524}{27} = 0,0011305 \text{ m}^2 \quad \text{equação (6)}$$



$$D_i = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,0011305}{\pi}} = 0,037939 \text{ m} \quad \text{equação (7)}$$

$$R_e = \frac{D_i V \rho_g}{\mu_g} = \frac{0,0454 \times 27 \times 1,359006146}{3,844434 \cdot 10^{-5}} = 43331,9894 \quad \text{equação (8)}$$

$$\frac{1}{\sqrt{0,06808575}} = -2 \log_{10} \left(\frac{0,002}{3,7 \times 0,0454} + \frac{2,51}{43331,9894 \sqrt{0,06808575}} \right) \quad \text{equação (10)}$$

$$\Delta p_t = \frac{fL}{D_i} \frac{\rho_g V^2}{2} = \frac{0,06808575 \times 65}{0,0454} \times \frac{1,359006146 \times 27^2}{2} = 48287,2734 \text{ N/m}^2 \quad \text{equação (11)}$$

$$\Delta p_c = \rho_g K \frac{V^2}{2g} = 1,359006146 \times (1+4,5) \frac{27^2}{2 \times 9,81} = 277,7235 \text{ N/m}^2 \quad \text{equação (12)}$$

$$\Delta p = \Delta p_t + \Delta p_c = 48287,2734 + 277,7235 = 48565 \text{ N/m}^2 \quad \text{equação (13)}$$

TRECHO A2

O dimensionamento e a quantificação da perda de carga desinente no trecho de tubulação A2, consiste na mesma metodologia de cálculo utilizada para o trecho A1, tendo como único parâmetro desigual entre os dois trechos a sua extensão, ou seja, a tubulação de ambos será igual, sendo modificado apenas a sua perda de pressão.

Neste contexto, a perda de pressão do trecho de tubulação A2 é descrita pela Equação 11, seguida pela Equação 12 e 13.

$$\Delta p_t = \frac{fL}{D_i} \frac{\rho_g V^2}{2} = \frac{0,06808575 \times 150}{0,0454} \times \frac{1,359006146 \times 27^2}{2} = 111432,17 \text{ N/m}^2 \quad \text{equação (11)}$$

$$\Delta p_c = \rho_g K \frac{V^2}{2g} = 1,359006146 \times (1+4,5) \frac{27^2}{2 \times 9,81} = 277,7235 \text{ N/m}^2 \quad \text{equação (12)}$$

$$\Delta p = \Delta p_t + \Delta p_c = 111432,17 + 277,7235 = 111709,89 \text{ N/m}^2 \quad \text{equação (13)}$$

TRECHO B

A vazão total que o trecho B tende a transferir para a rede secundária é equivalente a seis poços, subdivididos em dois grupos de 3 poços.

$$\frac{Q_{\text{total}}}{W_{\text{total}}} W_{\text{trecho}} = \frac{1,83142}{60} \times 3 = 0,091571 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{equação (16)}$$

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{0,091571}{27} = 0,0033915 \text{ m}^2 \quad \text{equação (6)}$$

$$D_i = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,0033915}{\pi}} = 0,065713 \text{ m} \quad \text{equação (7)}$$

$$R_e = \frac{D_i V \rho_g}{\mu_g} = \frac{0,0692 \times 27 \times 1,359006146}{3,844434 \cdot 10^{-5}} = 66047,878 \quad \text{equação (8)}$$

$$\frac{1}{\sqrt{0,0567704}} = -2 \log_{10} \left(\frac{0,002}{3,7 \times 0,0692} + \frac{2,51}{66047,878 \sqrt{0,0567704}} \right) \quad \text{equação (10)}$$

$$\Delta p_t = \frac{fL}{D_i} \frac{\rho_g V^2}{2} = \frac{0,0567704 \times 6}{0,0692} \times \frac{1,359006146 \times 27^2}{2} = 2438,294 \text{ N/m}^2 \quad \text{equação (11)}$$

$$\Delta p_c = \rho_g K \frac{V^2}{2g} = 1,359006146 (2 \times 1 + 2 \times 0,75 + 2 \times 4,5) \frac{27^2}{2 \times 9,81} = 631,189 \text{ N/m}^2 \quad \text{equação (12)}$$



A perda de carga será desinente da soma da perda de carga na tubulação, nas conexões, mais a perda de pressão dos trechos A1 e A2 que resultam no trecho B. Como cada lado do ponto de regularização de fluxo recebe três tubulações, a perda de pressão até o trecho B, foi descrita pela Equação 17.

$$\Delta p_m = 3 \Delta p_{A1} + 3 \Delta p_{A2} = 3 \times 48565 + 3 \times 111709,89 = 480824,67 \text{ N/m}^2 \quad \text{equação (17)}$$

Onde:

Δp_m : perda de carga até o manifold ou trecho B (N/m²)
 Δp_{A1} : perda de carga na tubulação do trecho A1 (N/m²)
 Δp_{A2} : perda de carga na tubulação do trecho A2 (N/m²)

Conforme supracitado, a perda de carga total do trecho de tubulação B, é representada pela Equação 18.

$$\Delta p = \Delta p_t + \Delta p_c + \Delta p_m = 2438,294 + 631,189 + 480824,67 = 483894,153 \text{ N/m}^2 \quad \text{equação (18)}$$

Onde:

Δp : perda de carga total (N/m²)
 Δp_t : perda de carga na tubulação (N/m²)
 Δp_c : perda de carga nas conexões (N/m²)
 Δp_m : perda de carga até o manifold (N/m²)

TRECHO C

O trecho de tubulação C irá receber a vazão de 30 poços de captação. Logo, há dois meios de dimensioná-la.

A primeira seria considerar o diâmetro da tubulação aumentando concomitantemente ao incremento de vazão que o trecho recebe ao longo de sua extensão. Não obstante, a segunda metodologia seria especificar um diâmetro para todo o trecho C, que suporte a vazão dos trinta drenos de extração.

Neste trabalho, foi utilizado a segunda sistemática citada acima, pois tende a diminuir os esforços na futura execução da tubulação. Desta forma, a vazão do trecho de tubulação C é apresentada na Equação 16.

$$\frac{Q_{\text{total}}}{W_{\text{total}}} W_{\text{trecho}} = \frac{1,83142}{60} 30 = 0,91571 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{equação (16)}$$

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{0,91571}{27} = 0,033915 \text{ m}^2 \quad \text{equação (6)}$$

$$D_i = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,033915}{\pi}} = 0,2078 \text{ m} \quad \text{equação (7)}$$

$$R_e = \frac{D_i V \rho_g}{\mu_g} = \frac{0,211 \times 27 \times 1,359006146}{3,844434 \cdot 10^{-5}} = 201388,76 \quad \text{equação (8)}$$

$$\frac{1}{\sqrt{0,037538}} = -2 \log_{10} \left(\frac{0,002}{3,7 \times 0,211} + \frac{2,51}{201388,76 \sqrt{0,037538}} \right) \quad \text{equação (10)}$$

$$\Delta p_t = \frac{fL}{D_i} \frac{\rho_g V^2}{2} = \frac{0,037538 \times 1000}{0,211} \times \frac{1,359006146 \times 27^2}{2} = 88126,724 \text{ N/m}^2 \quad \text{equação (11)}$$

$$\Delta p_c = \rho_g K \frac{V^2}{2g} = 1,359006146 \times (0,75 + 4,5) \frac{27^2}{2 \times 9,81} = 256,10 \text{ N/m}^2 \quad \text{equação (12)}$$

$$\Delta p = 88126,724 + 256,10 + (5 \times 483894,153) = 2507853,589 \text{ N/m}^2 \quad \text{equação (13)}$$



TRECHO D

A vazão pertencente a este trecho é equivalente a vazão total do gás de aterro. Como ilustrado pela Equação 16.

$$\frac{Q_{\text{total}}}{W_{\text{total}}} W_{\text{trecho}} = \frac{1,83142}{60} 60 = 1,83142 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{equação (16)}$$

$$A = \frac{Q}{V} = \frac{1,83142}{27} = 0,06783 \text{ m}^2 \quad \text{equação (6)}$$

$$D_i = \sqrt{\frac{4A}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \times 0,06783}{\pi}} = 0,29388 \text{ m} \quad \text{equação (7)}$$

$$R_e = \frac{D_i V \rho_g}{\mu_g} = \frac{0,2954 \times 27 \times 1,359006146}{3,844434 \cdot 10^{-5}} = 281944,266 \quad \text{equação (8)}$$

$$\frac{1}{\sqrt{0,0336373}} = -2 \log_{10} \left(\frac{0,002}{3,7 \times 0,2954} + \frac{2,51}{281944,266 \sqrt{0,0336373}} \right) \quad \text{equação (10)}$$

$$\Delta p_t = \frac{fL}{D_i} \frac{\rho_g V^2}{2} = \frac{0,0336373 \times 100}{0,2954} \times \frac{1,359006146 \times 27^2}{2} = 5640,6557 \text{ N/m}^2 \quad \text{equação (11)}$$

$$\Delta p_c = \rho_g K \frac{V^2}{2g} = 1,359006146 \times (1+4,5) \frac{27^2}{2 \times 9,81} = 277,7235 \text{ N/m}^2 \quad \text{equação (12)}$$

Desta maneira, a perda de pressão total é resultante da soma da perda de carga na tubulação, nas conexões, e nas duas redes secundárias (trecho D).

$$\Delta p = 5640,6557 + 277,7235 + (2 \times 2507853,589) = 5021625,5572 \text{ N/m}^2 \quad \text{equação (13)}$$

Os resultados obtidos nos dimensionamentos supracitados, conforme a divisão da rede de transporte apresentada na Figura 6, são expostos na Tabela 3.

Tabela 3 - Apresentação dos resultados obtidos no dimensionamento da rede de transporte

Descrição	Extensão (m)	Vazão (m³/s)	Diâmetro nominal (mm)	Perda de carga no trecho (N/m²)	Perda de carga acumulada (N/m²)
Trecho A1	65	0,030524	50	48565	-
Trecho A2	150	0,030524	50	111709,89	-
Trecho B	6	0,091571	75	3069,483	480824,67
Trecho C	1000	0,91571	225	88382,824	2507853,589
Trecho D	100	1,83142	315	5918,3792	5021625,5572

Fonte: AUTOR

SECAGEM

Para conjecturar a quantidade de umidade que deve ser retida nos condensadores, foi utilizada a Equação 14.

$$h = \frac{P_v V}{CT} = \frac{0,048 \cdot 1}{0,082 \cdot (273+20)} = 0,00199783 \text{ kg/mol} \quad \text{equação (14)}$$

Multiplicando o resultado da Equação 15 por 18, uma vez que cada mol refere-se a 18g de água, foi possível contabilizar a quantidade de água em litros para cada metro cúbico de biogás.

$$0,00199783 \cdot 18 = 0,03596 \text{ l/m}^3 \quad \text{equação (17)}$$

No presente estudo, foi estipulado um condensador após cada ponto de regulação de fluxo (trecho B), com espaçamento de 167 m. Direcionando assim, a mesma quantidade de líquidos para cada condensador, conforme



apresentado na Figura 6. Neste segmento, cada condensador irá receber a vazão de biogás correspondente a seis poços de extração, conforme a Equação 16.

$$\frac{Q_{\text{total}}}{W_{\text{total}}} W_{\text{trecho}} = \frac{1,83142}{60} 6 = 0,183142 \text{ m}^3/\text{s} \quad \text{equação (16)}$$

Portanto, para quantificar quantos litros por segundo cada condensador irá receber, foi necessário multiplicar o resultado da Equação 16 pela resultante da Equação 17.

$$0,03596 \times 0,183142 = 0,006585786 \text{ l/s} \quad \text{equação (18)}$$

Estimando que cada condensador deve ser exaurido no mínimo uma vez ao dia, é possível determinar a umidade total que estes devem suportar multiplicando o resultado da Equação 18 pela quantidade de segundos que compõe um dia (86400s).

$$0,006585786 \times 86400 = 569,012 \text{ l/dia} \quad \text{equação (19)}$$

Conseqüentemente, foi estipulado cinco condensadores que suportem no mínimo 570 litros de armazenamento.

SOPRADORES

A potência do conjunto de sopradores foi estimada pela Equação 15.

$$P_S = \frac{5021625,5572 \times 1,8314}{550} = 16721,1\text{W} \quad \text{equação (15)}$$

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como objetivo geral propor o dimensionamento e projeto do sistema de captação para o biogás oriundo do aterro sanitário Rincão das Flores. Objetivo este, atingido e detalhado ao longo deste capítulo.

No que tange propor e dimensionar os drenos de captação do biogás gerado no AS em estudo, foram dimensionados e projetados os drenos de extração de modo que a disposição dos mesmos envolvesse aproximadamente 92% da área do aterro sanitário, administrando a melhor relação custo benefício. Para este fim, foi quantificado 60 poços de captação, distribuídos de forma triangular, com um espaçamento de 112,45 m.

Contudo, para atender a proposta de sugerir e mensurar o processo de transporte do biogás produzido no aterro sanitário em estudo, incluindo o pré-tratamento requerido pelo mesmo, foi necessário primeiramente esboçar o layout da rede de captação e transporte de biogás no AS. Este, por sua vez, pode ser analisado na Figura 6.

Após analisar inúmeros arranjos para a rede de transporte, foi necessário subdividir os trechos de tubulação, a fim de dimensioná-los conforme a vazão de biogás decorrente em cada segmento. Deste modo, os trechos A1 e A2, possuem o diâmetro de 50 mm. O trecho B, detém o diâmetro de 75 mm, enquanto o trecho C foi estabelecido com diâmetro nominal de 225 mm e o trecho D com o diâmetro de 315 mm.

Em seguida ao dimensionamento, foi possível estabelecer a perda de carga decorrente em toda a extensão da tubulação. Tal perda de pressão foi crucial para identificar a potência necessária para extrair o biogás do interior do AS pelo conjunto de sopradores.

Pertinente ao pré-tratamento, foi proposto um projeto para a remoção de condensados, constituído de dez condensadores distribuídos a uma distância de 167 m, onde cada condensador aprisiona cerca de 570 litros de água diariamente.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS (ANP). *Análise da influência de parâmetros utilizados no modelo de cálculo da capacidade*. Rio de Janeiro, 2013. Disponível em: <<http://www.anp.gov.br/?dw=69116>>. Acesso em: 30 set. 2016.
2. BAGCHI, Amalendu. *Design of landfills and integrated solid waste management*. 3. ed. New Jersey: John Wiley e Sons, 2004.
3. BRITO FILHO, Luiz. *Estudo de gases em aterros de resíduos sólidos urbanos*. 2005. 218 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Departamento de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: <<http://docplayer.com.br/14550211-Estudo-de-gases-em-aterros-de-residuos-solidos-urbanos-luiz-fernandes-de-brito-filho.html>>. Acesso em: 29 ago. 2016.
4. CARDOSO, Gabriel; FRIZZONE, José; REZENDE, Roberto. *Fator de atrito em tubos de polietileno de pequenos diâmetros*. Acta Scientiarum. Agronomy, Maringá, v. 30, n. 3, p. 299-305, 2008. Disponível em: <<http://eduem.uem.br/ojs/index.php/ActaSciAgron/article/view/3497/2476>>. Acesso em: 15 set. 2016.
5. CAVINATTO, Vilma; RODRIGUES, Francisco. *Lixo: de onde vem? Para onde vai?* 2. ed. São Paulo: Moderna, 2010.
6. DANTAS NETO, José; SOUZA, José. *Equação explícita para cálculo do fator de atrito de Darcy-Weisbach em projetos de irrigação pressurizada*. [S.l.], 2014. Disponível em: <<http://irriga.fca.unesp.br/index.php/irriga/article/view/726/914>>. Acesso em: 15 set. 2016.
7. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). *Landfill manuals: landfill site design*. Irlanda, [2016?]. Disponível em: <https://www.epa.ie/pubs/advice/waste/waste/EPA_landfill_site_design_guide.pdf>. Acesso em: 01 set. 2016.
8. FARQUHAR, Grahame; MCBEAN, Edward; ROVERS, Frank. *Solid waste landfill engineering and design*. 1. ed. Estados Unidos: Prentice-Hall, 1995.
9. GONÇALVES, Rafael. *Avaliação da perda de carga e do fator de atrito no escoamento de fluidos de perfuração em geometrias circular e anulares concêntricos*. Dissertação (Pós-graduação em Engenharia Química) – Departamento de Engenharia Química, Instituto de Tecnologia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. Disponível em: <http://www.ufrjr.br/posgrad/cpeq/paginas/docs_teses_dissert/dissertacoes_docs_2008/Dissertacao_Rafael_Simoes.pdf>. Acesso em: 14 set. 2016.
10. KARLSSON, Tommy et al. *Manual básico de biogás*. Lajeado: Editora Univates, 1 ed. 2014.
11. LIMA, Luiz. *Lixo: tratamento e biorremediação*. 3. ed. Hemus, 2004.
12. PEREIRA, Mário. *Meio ambiente e tecnologia*. Rio de Janeiro: Editora Ciência Moderna, 2010.
13. POSTALI, Carla. *Estimativa de geração de metano e redução de emissões de gases do efeito estufa através da captação e queima para aterro o sanitário de Caxias do Sul*. 2014. 80 f. Trabalho de conclusão de curso (Engenharia Civil) – Curso de Engenharia Civil, Unidade Acadêmica de Graduação, Universidade do Vale do Rio dos Sinos, São Leopoldo, 2014. Acesso em: 24 jun. 2016.
14. PROJETO BRASIL ALEMANHA DE FOMENTO AO APROVEITAMENTO ENERGÉTICO DO BIOGÁS (PROBIOGÁS). *Guia prático do Biogás: geração e utilização*. Gülzow, 2010. Disponível em: <<http://www.cidades.gov.br/images/stories/ArquivosSNSA/probiogas/guia-pratico-do-biogas.pdf>>. Acesso em: 15 mai. 2016.
15. TELLES, Pedro. *Tubulações industriais: cálculo*. 8 ed. Rio de Janeiro: LTC S.A., 1994.