

Otimização do traçado de redes coletoras de esgoto sanitário via algoritmo genético

• **Data de entrada:**
03/01/2018

Sanitary sewer network's layout optimization by genetic algorithm

• **Data de aprovação:**
06/08/2018

Gustavo Paiva Weyne Rodrigues^{1*} | Guilherme Marques Farias¹ |
Luís Henrique Magalhães Costa¹ | Marco Aurélio Holanda de Castro²

DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.024>

ORCID ID

Rodrigues, G. P. W.  <https://orcid.org/0000-0003-1545-2758>
Farias, G. M.  <https://orcid.org/0000-0002-6726-9210>

Costa, L.H. M.  <https://orcid.org/0000-0002-1781-4188>
Castro, MA. H.  <https://orcid.org/0000-0001-5134-7213>

Resumo

A crescente urbanização das cidades vem fazendo com que as concessionárias de saneamento e os órgãos governamentais adequem e aprimorem os sistemas, seja por meio da implantação de novas redes ou pela expansão das já existentes. No entanto, um dos entraves para a expansão rápida desses sistemas de saneamento é o custo de implantação das redes de coleta e transporte de esgoto sanitário. Este trabalho tem como objetivo utilizar o conceito de algoritmo genético para desenvolver um modelo computacional que seja capaz de minimizar o custo de implantação de uma rede coletora de esgoto considerando o respectivo traçado. Utilizou-se o algoritmo genético do tipo binário, nos quais os genes podem assumir os valores 0 ou 1. O valor da função objetivo para o problema proposto é composto pela soma dos custos com tubulações e volume escavado. O artigo aborda a utilização do modelo construído em um estudo de caso de uma rede hipotética contendo 12 trechos. Observaram-se resultados satisfatórios tanto em relação ao tempo computacional como quanto à consistência dos resultados encontrados, pois em todos os testes o AG (Algoritmo Genético) encontrou soluções viáveis aceitáveis.

Palavras-chave: Redes coletoras de esgoto. Otimização. Algoritmo Genético.

Abstract

The increasing cities' urbanization has made sanitary sewer public companies improve these systems, through the implementation of new networks or expanding existing ones. However, one of the obstacles to the rapid expansion of these sewer systems is the network execution cost. This paper aims to use the concept of genetic algorithm to develop a computational model that is able to minimize the network sewer systems' costs considering the respective route. A binary type of genetic algorithm was used and genes may assume 0 or 1 values. The objective function's for the problem proposed is the sum of costs with sewer pipes and excavated volume. The article deals with the built model of a case study for a hypothetical network which contains 12 pipes. Satisfactory results could be observed concerning the computational time and the consistency of the results found, because in all the tests GA (Genetic Algorithm) found acceptable and viable solutions.

Keywords: Sanitary sewer networks. Optimization. Genetic Algorithm.

¹ Universidade Estadual Vale do Acaraú. Sobral - CE - Brasil.

² Universidade Federal do Ceará. Fortaleza - CE - Brasil.

* **Autor correspondente:** gustavo_weyne@uvanet.br.

1 INTRODUÇÃO

O investimento em saneamento é imprescindível, pois promove a saúde pública preventiva, reduzindo a necessidade de procura aos hospitais e postos de saúde, porque elimina a chance de contágio por diversas moléstias. Apesar de reconhecida a importância das infraestruturas de saneamento por meio da Lei 11.445/2007, emitida por BRASIL (2007) e conhecida como a Lei de Saneamento Básico, a situação do Brasil nesse aspecto ainda requer muita atenção.

De acordo com Velasco (2017), em 2007, quando a lei supracitada foi sancionada, 42% da população era atendida por redes de esgoto. Até 2015, o índice aumentou 8,3%, o que corresponde a menos de um ponto porcentual por ano. Quanto ao abastecimento de água, apesar de a abrangência ser bem superior à de esgoto, a evolução foi ainda mais branda: passou de 80,9% em 2007 para 83,3% em 2015, um aumento de apenas 2,4 pontos porcentuais. O índice de esgoto tratado passou de 32,5% para 42,7%.

O custo para implantação ainda é um grande empecilho para a universalização dos sistemas de esgotamento sanitário no Brasil. O traçado da rede tem impacto direto sobre o custo final, haja vista que, dependendo da configuração, pode-se ter custos elevados com tubulações, escavações, estações elevatórias etc. Entre as alternativas de redução dos custos estão os estudos detalhados da concepção do sistema e do traçado da rede coletora de esgoto, que devem ser otimizados adequadamente, buscando utilizar sempre que possível a topografia natural do terreno.

Alem Sobrinho e Tsutiya (2000) citam que, de acordo com um estudo realizado pela Sabesp em 1980, os fatores de maior peso no custo total, pela ordem, em uma obra de esgotamento sanitário são: escoramento de valas, poços de visita, escavação de valas, reaterro de valas e reposição

de pavimentos. O escoramento, a escavação e o reaterro das valas estão relacionados à profundidade da rede, que por sua vez está relacionada diretamente ao tipo de traçado adotado.

A aplicação de modelagem computacional referente ao traçado de redes coletoras de esgoto sanitário vem sendo comumente utilizada, como no trabalho de Moeini e Afshar (2012), que utilizaram o algoritmo de otimização colônia de formigas a fim de encontrar uma configuração de traçado que resultasse em uma minimização dos custos com os diâmetros dos tubos coletores.

Gameiro (2003) e Rodrigues (2011) desenvolveram modelos que buscam a combinação mais adequada de diâmetro e declividade com o intuito de reduzir o custo final da rede. Apesar de a metodologia utilizada nos dois casos ser semelhante, os autores utilizaram algoritmos de otimização diferentes. O primeiro autor utilizou a técnica evolucionária de algoritmos genéticos, e o segundo implementou um algoritmo híbrido de busca exaustiva.

Apesar do avanço tecnológico dos computadores, há poucas pesquisas envolvendo a otimização de traçado de redes de esgoto. Diante disso, o modelo computacional apresentado neste trabalho tem como objetivo utilizar a técnica evolucionária de algoritmos genéticos para otimizar o traçado de uma rede coletora de esgoto, ou seja, definir uma configuração que minimize o custo final. Para tal, utilizou-se uma rede hipotética, onde foram inicialmente analisadas todas as soluções viáveis possíveis e, posteriormente, utilizou-se o algoritmo genético com a finalidade de verificar e confirmar a aplicabilidade na resolução do problema. O algoritmo genético convencional utilizado é do tipo binário, e os custos analisados são os das tubulações e o volume de escavação, tendo como variáveis de decisão o sentido do escoamento e a definição dos trechos ponta-seca.

2 OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo geral utilizar o algoritmo genético em um modelo computacional para otimizar o traçado de redes coletoras de esgoto sanitário, apresentando o menor custo de instalação.

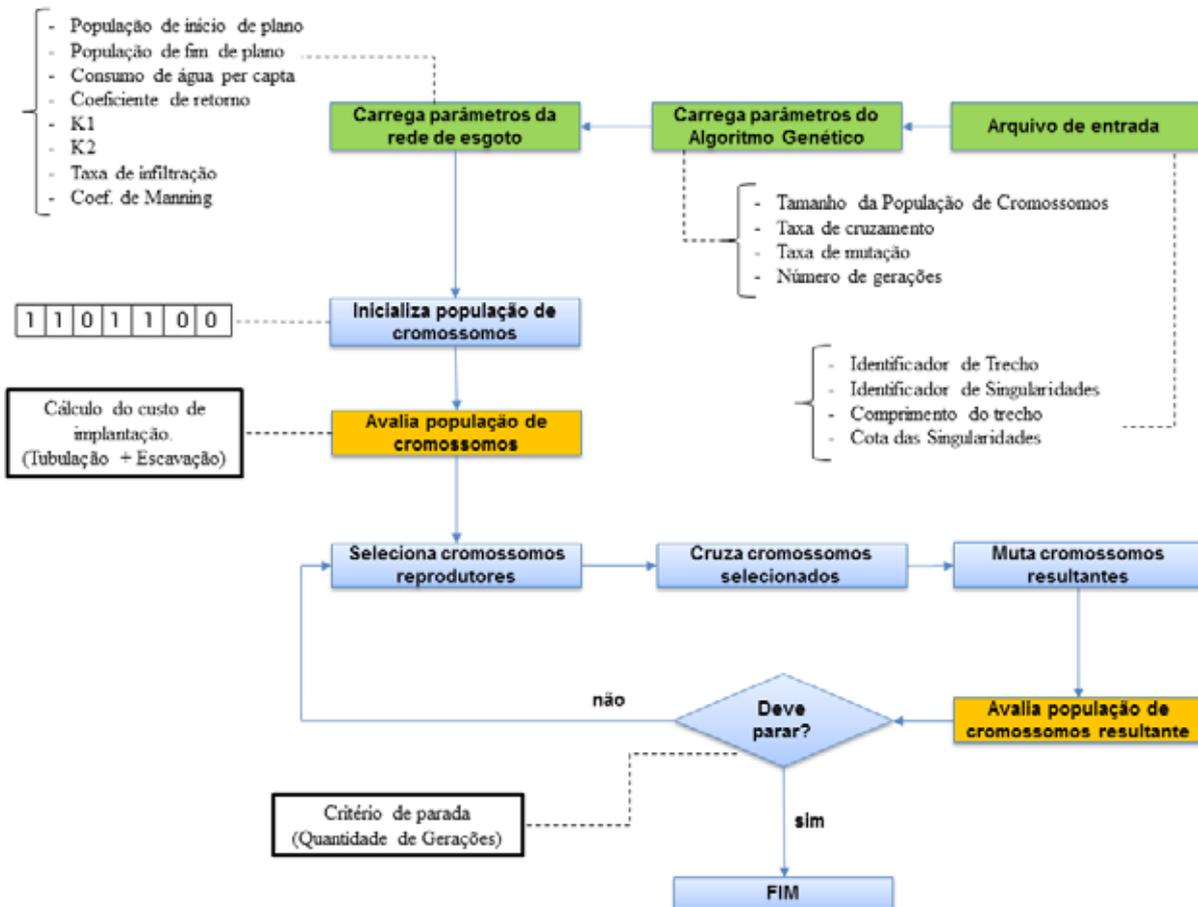
3 METODOLOGIA

As rotinas computacionais deste projeto foram desenvolvidas na linguagem JAVA, com o auxílio da IDE (Integrated Development Enviroment) NetBeans. O JAVA adequa-se aos propósitos de desenvolvimento do problema em questão devido ao conceito de orientação a objetos proporcionar

uma melhor organização na estrutura dos algoritmos, assim como um melhor tratamento de possível erros que possam vir a ocorrer. O computador utilizado na elaboração e execução do modelo tem um processador Intel Celeron Dual Core, com 4GB de memória RAM.

Em termos gerais, o modelo computacional abordado neste trabalho recebe uma malha (singularidades e trechos) predefinida pelo usuário e aplica o processo evolucionário do Algoritmo Genético, retornando como resultado do processamento a configuração de traçado que proporcione uma redução dos custos da rede. A Fig. 1 ilustra o fluxograma do processo de execução:

Figura 1: Fluxograma do modelo computacional proposto



O arquivo de entrada para o modelo computacional é composto por um conjunto de características pertinentes à rede, tais como: identificadores de trechos e singularidades, comprimento de trechos e cotas topográficas das singularidades. Além disso, deve-se identificar a singularidade de montante do emissário da rede coletora de esgoto (singularidade final), a fim de localizar o ponto onde as concentrações de vazões serão reunidas.

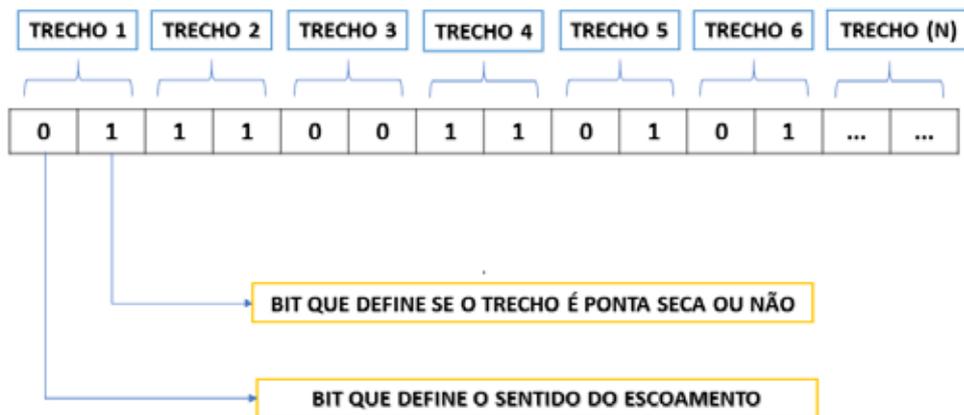
A técnica de algoritmos genéticos consiste na busca por soluções para um determinado problema de otimização utilizando mecanismos de seleção natural e de genética. Em resumo, tem-se um conjunto inicial de possíveis soluções, denominado população, gerados aleatoriamente, evoluindo por meio de operadores probabilísticos concebidos a partir de conceitos biológicos (seleção, cruzamento e mutação), de modo a ter uma tendência de que os indivíduos desta população, denominados “cromossomos”, representem soluções cada vez melhores a cada geração, ou seja, a cada iteração completa que dá início a uma nova população. O processo evolucionário repete-se até que um determinado critério de parada seja

satisfeito. Para o modelo em questão definiu-se como critério de parada o número de gerações.

Os cromossomos podem ser entendidos como uma estrutura de dados que representa uma possível solução para um problema, sendo compostos por um conjunto de “genes”. O gene é a representação de um parâmetro inerente ao problema, também chamado de variável de decisão, podendo ser expresso na forma binária (bit), inteira ou real. No modelo computacional proposto, o cromossomo é a representação do conjunto de trechos que formam um traçado e cada trecho é representado por um par de genes contendo informações binárias referentes ao sentido do escoamento e à classificação em ponta seca ou não.

O bit que define o sentido do escoamento assume o valor 0 se o trecho estiver obedecendo o caimento natural do terreno, e 1 se o sentido for contrário ao caimento natural. Para o bit responsável pela identificação dos trechos ponta seca, tem-se o valor 0 para um trecho ponta seca e 1 para a situação contrária, como pode ser constatado na Fig. 2.

Figura 2: Representação de um cromossomo



Ao serem gerados aleatoriamente na primeira geração do AG, os cromossomos da população inicial apresentam certa tendência no bit que define o sentido do escoamento, com o intuito de se obter cromossomos que se assemelhem a um traçado real. Enquanto o bit que define o trecho ponta seca possui probabilidades iguais para 0 ou 1, o bit do sentido de escoamento apresenta uma probabilidade de 80% para ser 0 e apenas 20% para ser 1, havendo uma convergência para que os trechos do traçado obedeçam ao caimento natural do terreno.

A cada geração, os cromossomos de uma população são avaliados por uma função objetivo e um valor de aptidão, permitindo que estes sejam ordenados e classificados. A aptidão é um valor que mensura o grau de adaptação de um indivíduo em relação aos demais, sendo decisiva para a escolha durante a seleção dos mais aptos, que posteriormente serão cruzados e darão origem a uma nova população. Neste estudo, a aptidão corresponde ao valor do custo de implantação (C) da rede de esgoto.

O valor de (C) – em R\$ - é expresso em termos matemáticos pela Eq. 1, onde NT equivale ao número de trechos da rede coletora de esgoto; L é o comprimento do trecho; e V representa a estimativa

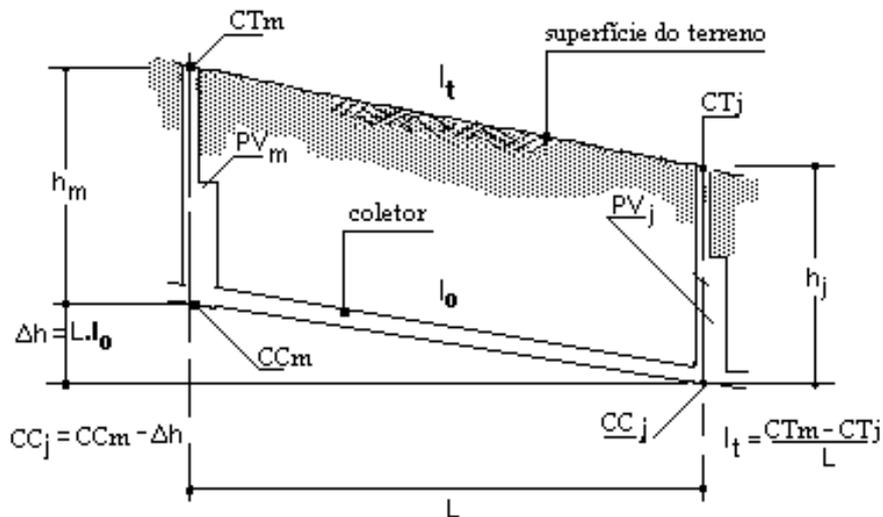
do volume de material a ser escavado no processo de abertura da vala. Os valores de (C_{Tub}) e (C_{Esc}) são obtidos em SEINFRA (2017) e correspondem, respectivamente, ao custo com tubulação por metro e custo de escavação por metro cúbico. Vale ressaltar que (C_{Tub}) varia de acordo com o diâmetro e (C_{Esc}) de acordo com a profundidade da vala a ser escavada.

$$C_I = \sum_{i=1}^{NT} [(C_{Tub(i)} \cdot L(i)) + (C_{Esc(i)} \cdot V(i))] \quad (1)$$

O cálculo da estimativa do volume de material a ser escavado (V) está diretamente ligado aos parâmetros obtidos após o dimensionamento hidráulico, os quais podem ser observados na Fig. 3, em que:

- **CTm**: cota do terreno a montante;
- **CTj**: cota do terreno a jusante;
- **hm**: profundidade do coletor a montante;
- **hj**: profundidade do coletor a jusante;
- **CCm**: cota do coletor a montante;
- **CCj**: cota do coletor a jusante;
- **It**: declividade do terreno;
- **lo**: declividade de projeto;
- **L**: comprimento do trecho.

Figura 3: Perfil longitudinal de um trecho coletor de esgoto



Fonte: EMBASA (2008)

De posse dos parâmetros apresentados na Fig. 3, é possível obter a área lateral (A_l) da vala admitindo que ela é uma representação de um trapézio formado pelos lados h_m , h_j , l_t e l_o , cujo valor é dado pela Eq. 2. O valor de (V) é obtido pela multiplicação entre (A) e a largura da vala, sendo esta calculada de acordo com as orientações da Tabela 1 de ABNT (1992), na qual o valor é estipulado em função do diâmetro nominal do coletor, cota de corte e o tipo de escoramento utilizado. Para este estudo, considerou-se um escoramento de pontaletes.

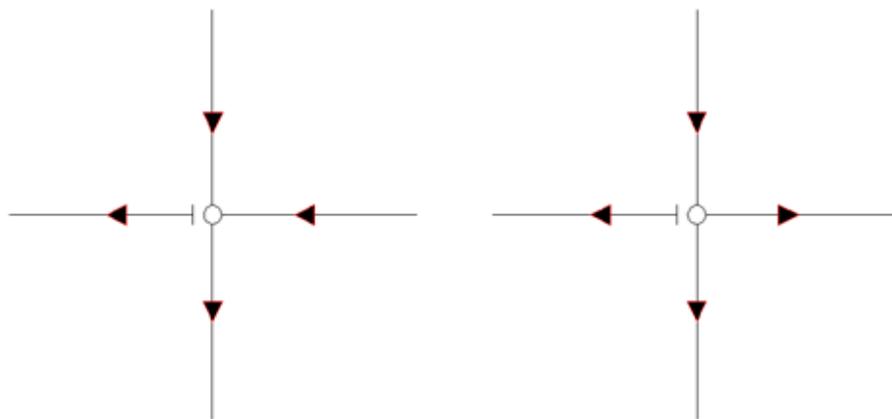
$$A_l = \frac{[(CT_j - CC_j) + (CT_m - CC_m)]}{2} L \quad (2)$$

No processo de avaliação da população existe uma verificação denominada teste de viabilidade, a qual tem influência direta sobre o valor da aptidão do cromossomo. Esse processo consiste em analisar cada cromossomo gerado pelo AG e verificar se atende às condições propostas, na qual o esgoto presente em todos os trechos deverá chegar na singularidade final da rede coletora, que será previamente definida pelo usuário.

O algoritmo do teste de viabilidade processa os dados do seguinte modo: após receber a configuração de traçado gerada pelo algoritmo genético, a rotina inicia a verificação, analisando se existe algum trecho efluente à singularidade final que não seja ponta seca. Caso essa situação seja constatada, o traçado é considerado inviável, pois a singularidade final deve ter apenas trechos afluentes. Caso o traçado passe na primeira restrição, inicia-se, então, a próxima etapa, que é a verificação da quantidade de trechos afluentes à singularidade final, pois ela obrigatoriamente deverá ser maior que zero.

Após as etapas supracitadas, dá-se início à verificação das demais restrições que se aplicam às singularidades restantes, onde se verifica inicialmente a quantidade de trechos efluentes a cada singularidade, que deve ser obrigatoriamente maior do que zero. Além disso, dos trechos efluentes encontrados deve-se ter somente um que não seja ponta seca. A Fig. 4 ilustra a situação descrita, estando o traçado viável e o inviável ilustrados do lado esquerdo e direito, respectivamente.

Figura 4: Traçados viável e inviável



Tendo o traçado passado pelas restrições ora mencionadas, verificam-se todas as singularidades a fim de confirmar se todas as que possuem trechos afluentes têm um trecho efluente que não seja ponta seca para, assim, dar continuidade ao fluxo de esgotamento. Posteriormente, dá-se continuidade à análise realizando o processo inverso, ou seja, verificando, para cada singularidade com trecho efluente não ponta seca, se existe um trecho afluente.

A última restrição para que o traçado seja considerado viável é realizada, verificando-se se o fluxo de esgoto que parte de cada órgão acessório chega na singularidade final. No caso de o traçado atender a todos esses requisitos, ele é considerado viável, caso contrário o cromossomo que o representa recebe uma penalização no valor da concorrente aptidão, onde se é atribuído um valor inicial de R\$ 100.000,00 e para cada trecho do traçado que está no sentido contrário ao caimento natural do terreno é adicionado um valor de R\$ 1.000,00. Essa penalização tem como objetivo aumentar o valor da aptidão do cromossomo diminuindo suas chances de ser selecionado para cruzar e gerar descendentes com as características dele. Os valores foram atribuídos exclusivamente para o estudo de caso abordado neste artigo.

Confirmando-se a viabilidade do traçado gerado pelo AG, dá-se início ao processo de dimensionamento hidráulico. Uma série de restrições técnicas é estipulada por ABNT (1986). Essas especificações estão listadas a seguir:

- **Vazão mínima considerada para dimensionamento hidráulico:** para a determinação das dimensões de qualquer trecho, a vazão não deve ser inferior a 1,5 L/s, o que equivale à vazão média de uma descarga de vaso sanitário. Sempre que a vazão de jusante de qualquer trecho for menor que 1,5 L/s, esse valor deve ser utilizado para os cálculos hidráulicos;

- **Diâmetro mínimo do coletor:** não deve ser inferior a 100 mm. As concessionárias de saneamento costumam exigir no mínimo 150 mm para a rede coletora pública;

- **Tensão trativa mínima:** para assegurar a auto-limpeza do coletor, esse parâmetro não deve ser inferior a 1,0 Pa (1,0 N/m²);

- **Velocidade máxima:** a velocidade não deve ser superior a 5,0 m/s para evitar riscos às estruturas e cargas abrasivas nas paredes dos coletores;

- **Declividade mínima:** para garantir as condições mínimas de arraste, a declividade mínima do coletor deve obedecer à seguinte expressão (para n de Manning = 0,013): **$I_{min} = 0,005 Q^{-0,47}$** , sendo I_{min} em m/m e Q (vazão de esgoto no coletor) em L/s;

- **Lâmina d'água:** deve, no máximo, alcançar 75% do diâmetro do coletor, garantindo condições de escoamento livre e de ventilação. Entretanto, nos casos em que a velocidade de fim de plano no coletor ultrapassar a velocidade crítica, a lâmina d'água não deve ser superior a 50% do diâmetro do tubo.

O processo de dimensionamento hidráulico é um dos mais importantes, haja vista que, após a conclusão, tem-se o arranjo de diâmetros e declividades dos trechos coletores da rede, que são necessários para o cálculo dos custos envolvidos no problema em questão e, conseqüentemente, o valor da aptidão do cromossomo gerado pelo AG.

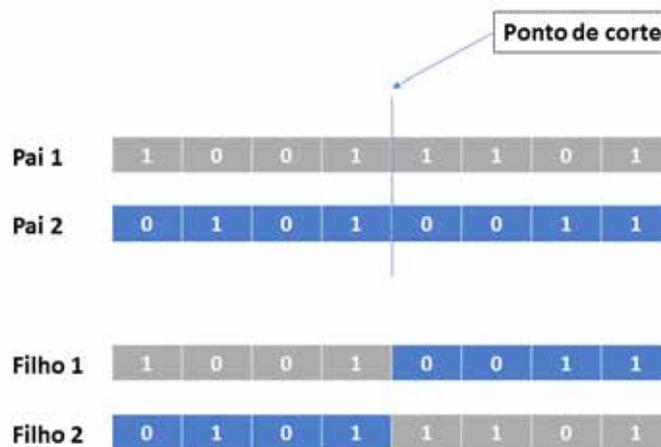
A seleção dos cromossomos mais aptos é realizada utilizando-se o método do torneio, pois apresenta uma maior facilidade de implementação e demanda menor tempo computacional em relação a outros tipos, como o da roleta. Esse método consiste em escolher dois cromossomos da população aleatoriamente com iguais probabilidades e selecionar o que tiver o melhor valor de aptidão. Para o modelo, o melhor cromossomo é o que tiver o menor custo.

Após serem ordenados na fila de seleção, os cromossomos são escolhidos dois a dois e submetidos a um teste para saber se irão cruzar. A existência de cruzamento será definida mediante um número entre 0 e 1 gerado aleatoriamente. Posteriormente, compara-se esse valor com um parâmetro do AG denominado taxa de cruzamento, definido antes do início do processo evolucionário e que determina a probabilidade de haver cruzamento. Sendo o valor aleatório maior do que a taxa de cruzamento os cromossomos não cruzam e são mantidas as características deles para as

próximas gerações; caso contrário, haverá o cruzamento entre os cromossomos “pais”, gerando novos cromossomos, denominados “filhos”.

Após vários testes com métodos de cruzamentos diferentes, optou-se pelo cruzamento em um ponto, pois a utilização dele resultou em soluções viáveis nas primeiras gerações, mais precisamente na geração 25. No processo de cruzamento, gera-se um número inteiro aleatório que definirá um ponto de corte; a partir deste, os genes dos “pais” serão trocados dando origem aos “filhos”, como pode ser observado na Fig. 5.

Figura 5: Cruzamento em um ponto.



O operador probabilístico de mutação incide sobre os cromossomos “filhos” gerados a partir do cruzamento. Nesta etapa, os genes dos cromossomos são alterados mediante uma probabilidade denominada taxa de mutação. Para cada gene, compara-se a taxa de mutação com um número gerado aleatoriamente entre 0 e 1. A alteração do valor do gene ocorrerá se o aleatório for menor ou igual à taxa de mutação. Esse processo permite que a população seja diversificada, de forma a evitar que os cromossomos se concentrem em uma única região do espaço de busca.

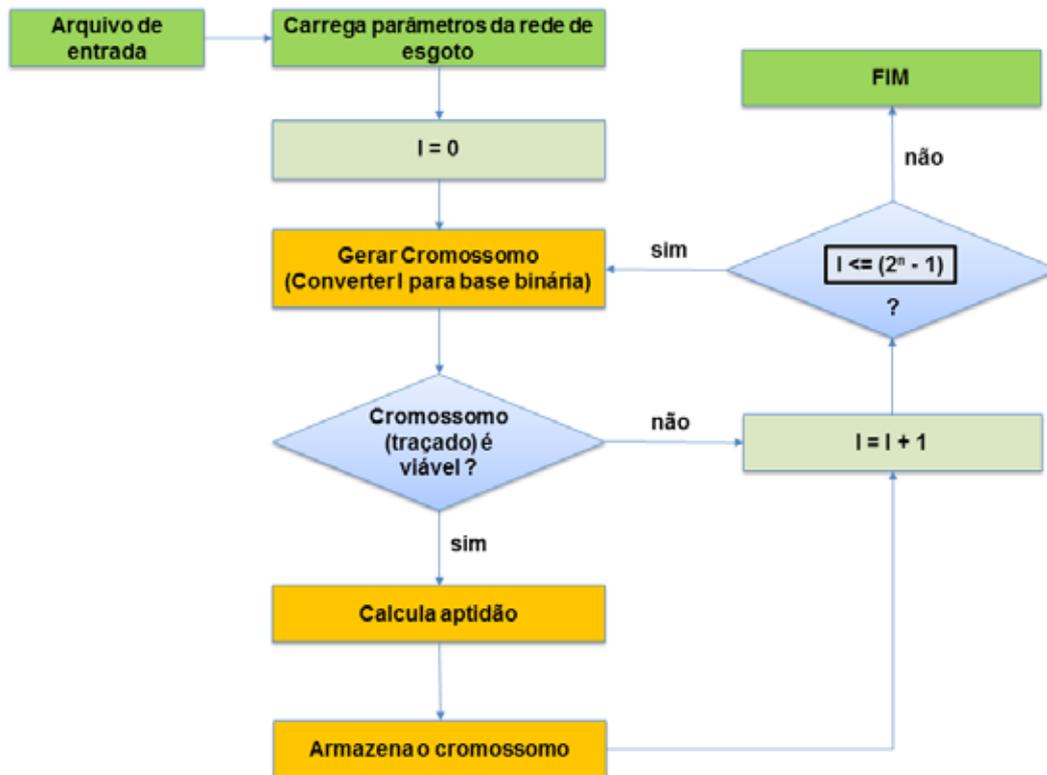
Para o processo de validação do modelo computacional proposto, compara-se o valor obtido pelo AG com o de uma rotina computacional alternativa criada para encontrar o traçado ótimo global, sendo este o que entre todas as soluções viáveis possíveis tiver o menor custo. O objetivo desta análise e comparação é ver o quanto a AG aproxima-se da solução real. O processo para encontrar o traçado ótimo global consiste em analisar todos os cromossomos formados pelos valores convertidos para binário entre 0 e $(2n - 1)$, em que n equivalente ao número de trechos multiplicado por 2, e submetê-los à verificação de viabilidade e

ao cálculo de aptidão propostos para os cromossomos gerados pelo AG, conforme ilustra a Fig. 6. De posse dos dois valores de custo, realiza-se uma comparação utilizando a fórmula do erro relativo, descrita na Eq. 3, onde C_o representa o custo ob-

tido com a solução ótima do AG e C_{og} é o custo encontrado na solução ótima global.

$$Er = \left(\frac{C_o - C_{og}}{C_{og}} \right) 100 \quad (3)$$

Figura 6: Modelo alternativo para encontrar o traçado ótimo global.



4 RESULTADOS

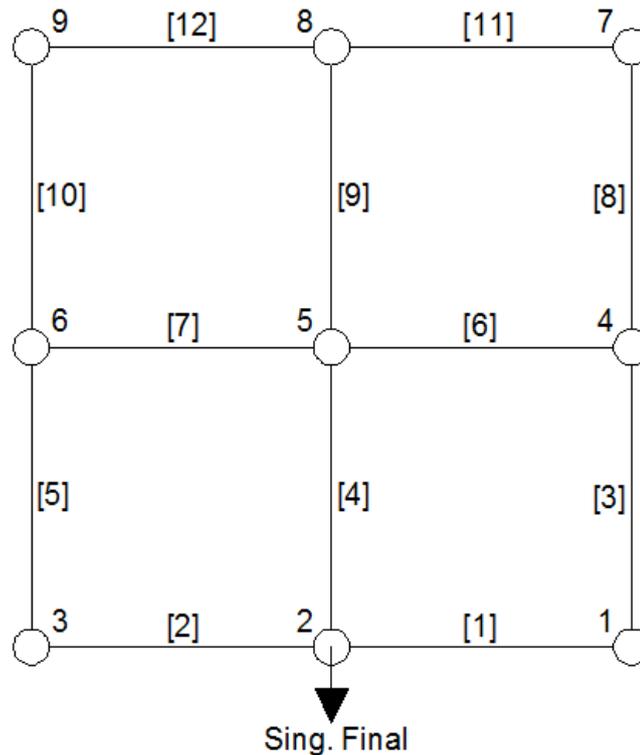
Com a finalidade de confirmar a aplicabilidade do modelo computacional proposto, tem-se um estudo de caso contendo uma malha hipotética com 12 trechos e 9 singularidades. Essa rede foi utilizada por Moeini e Afshar (2012) e está esboçada na Fig. 7. Para a simulação do modelo, considerou-se a singularidade número 2 como sendo a singularidade final.

No processo de dimensionamento hidráulico foram utilizados dados hipotéticos e considerou-se que o material da tubulação é concreto, cujo coeficiente de Manning é igual a 0,013. Além disso,

fixou-se como diâmetro e recobrimento mínimo os valores de 150 mm e 90 cm, respectivamente. Os dados utilizados estão descritos a seguir:

- População de início de plano: 2.000 habitantes
- População de fim de plano: 3.500 habitantes
- Consumo de água efetivo per capita: 160 l/hab x dia
- Coeficiente de retorno: 0,8
- Coeficiente de máxima vazão diária: 1,2
- Coeficiente de máxima vazão horária: 1,5
- Taxa de contribuição de infiltração: 0,1 l/s x km

Figura 7: Malha hipotética utilizada no estudo de caso.



Fonte: Adaptado de Moeini e Afshar (2012)

Para a malha hipotética utilizada como arquivo de entrada, atribuíram-se características aos trechos e singularidades, as quais estão listadas na Tabela 1. Vale ressaltar que a ordem das

singularidades e das cotas topográficas não expressam o sentido do escoamento, pois este será definido pelo AG por meio do bit que define o sentido do escoamento.

Tabela 1: Características dos trechos coletores que compõem a malha hipotética.

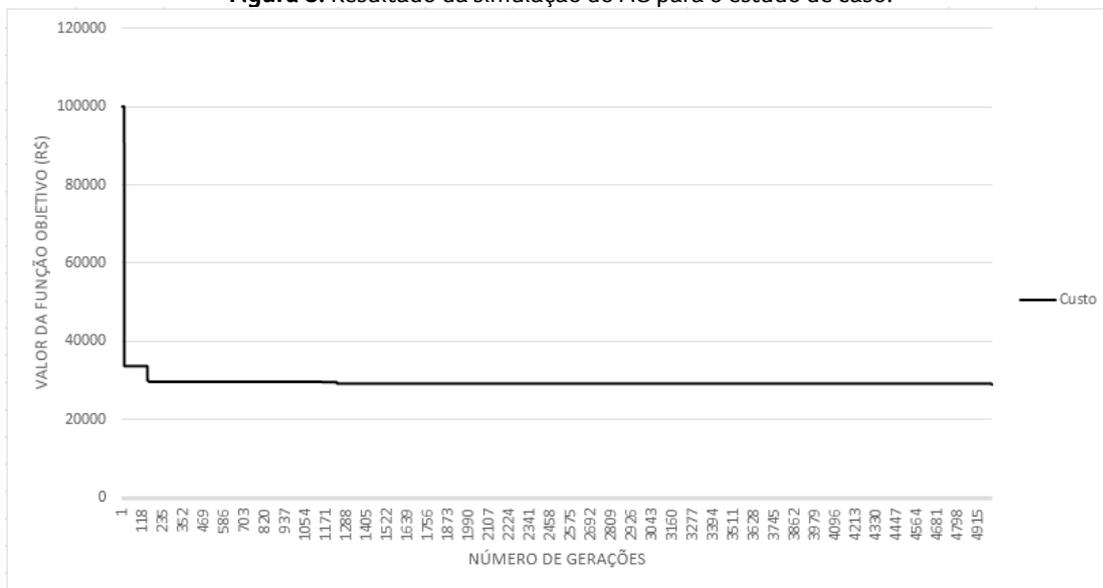
Trecho	Singularidade 1	Singularidade 2	Cota de terreno 1 (m)	Cota de terreno 2 (m)	Comprimento (m)
1	2	1	9.45	9.60	60
2	3	2	9.20	9.45	60
3	4	1	9.40	9.60	60
4	5	2	9.80	9.45	60
5	6	3	10.0	9.20	60
6	5	4	9.80	9.40	60
7	6	5	10.0	9.80	60
8	7	4	10.20	9.40	60
9	8	5	10.40	9.80	60
10	9	6	10.60	10.0	60
11	8	7	10.40	10.20	60
12	8	9	10.40	10.60	60

Para este estudo, estipulou-se como critério de parada o valor de 5.000 gerações. No que diz respeito ao tamanho da população de cromossomos, são necessários cautela e atenção, conforme relata COSTA (2010), pois quanto maior a população, maior será a diversidade de soluções. Entretanto, a execução exigirá um abundante tempo computacional, devido à quantidade mais elevada de avaliações dos indivíduos e das operações genéticas. Por outro lado, em pequenas populações, apesar de demandar um tempo

computacional inferior, fornece-se uma reduzida cobertura do espaço de busca, tornando o algoritmo menos eficiente. Obedecendo a essa premissa, utilizou-se nesta simulação uma população de 200 cromossomos.

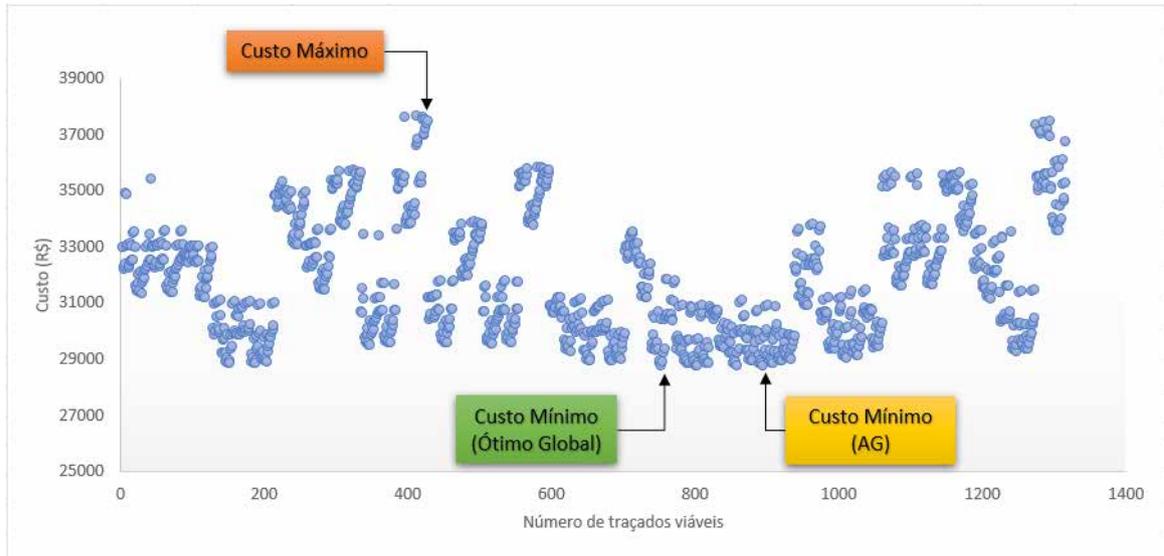
O tempo computacional decorrente no processo de execução do AG foi de 1 minuto e 10 segundos, e os resultados podem ser verificados no gráfico da Fig. 8. Foram encontrados 57 traçados viáveis, sendo o valor de R\$ 28.894,35 o custo do traçado ótimo.

Figura 8: Resultado da simulação do AG para o estudo de caso.



Para a validação dos dados, o traçado ótimo global foi encontrado analisando-se os cromossomos formados pelos valores convertidos em binário entre 0 e 16.777.215, sendo o limite superior deste intervalo equivalente a $(2^{24} - 1)$. O

processo decorreu em um tempo computacional de 12 minutos e 45 segundos, e como resultado foram encontrados 1.315 traçados viáveis possíveis. Os resultados podem ser observados na Fig. 9 e na Tabela 2.

Figura 9: Dados da análise da solução ótima global.**Tabela 2:** Resumo de dados da análise da solução ótima global.

	Nº Decimal	Cromossomo Binário	Aptidão
Custo Máximo	5.166.751	[010011101101011010011111]	R\$ 37.717,67
Custo Mínimo (AG)	8.210.692	[011111010100100100000100]	R\$ 28.894,35
Custo Mínimo (Ótimo Global)	8.131.904	[011111000001010101000000]	R\$ 28.801,52

A comparação entre os custos resultou em um erro relativo de 0,32 %. Analisando-se esse dado, percebe-se que o valor obtido pelo AG convergiu e aproximou-se bastante do custo ótimo global, apesar do espaço de busca reduzido, pois foram encontrados apenas 57 traçados viáveis dentre os 1.315 possíveis, o que denota a viabilidade do modelo proposto. Ao se comparar o tempo computacional dos modelos, percebeu-se que o AG demandou um tempo de execução reduzido mesmo com um número de gerações expressivo adotado.

A Fig. 10 ilustra o traçado ótimo global e o traçado ótimo, estando localizados à esquerda e à direita, respectivamente. Percebe-se que o traçado ótimo global apresenta os trechos 2 e 3 com topografia desfavorável. O traçado ótimo possui os trechos 2, 3 e 7 nessa situação, o que acarretou em uma diferença de custo entre os traçados. O trecho 7 provoca um aumento na profundidade de montante do trecho 5, ocasionando uma elevação no custo de escavação do referido trecho. Os dados citados podem ser observados na Tabela 3.

Figura 10: Traçados gerados pelo AG e pelo modelo da solução ótima global.

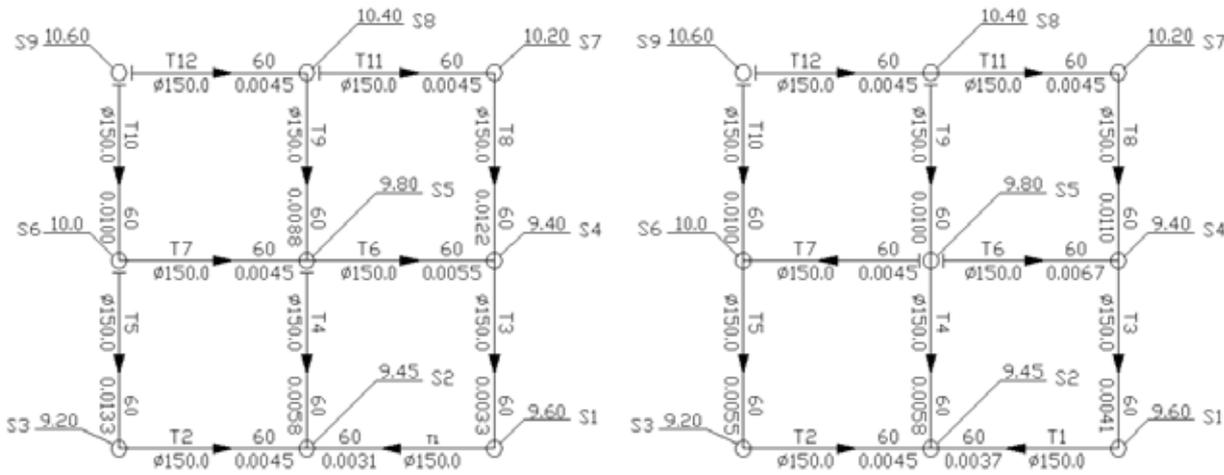


Tabela 3: Arranjo de diâmetros, declividades e custos para a rede hipotética.

Trecho	L(m)	Solução Ótima Global				Solução Ótima (AG)			
		Diâm. (mm)	Decliv. (m/m)	Custo da tub. (R\$)	Custo de escavação (R\$)	Diâm. (mm)	Decliv. (m/m)	Custo da tub. (R\$)	Custo de escavação (R\$)
1	60	150	0,0031	2.212,2	241,78	150	0,0037	2.212,2	253,23
2	60	150	0,0045	2.212,2	216,00	150	0,0045	2.212,2	215,95
3	60	150	0,0033	2.212,2	205,61	150	0,0041	2.212,2	209,61
4	60	150	0,0058	2.212,2	172,92	150	0,0058	2.212,2	172,92
5	60	150	0,0133	2.212,2	172,92	150	0,0055	2.212,2	211,64
6	60	150	0,0055	2.212,2	178,70	150	0,0067	2.212,2	172,95
7	60	150	0,0045	2.212,2	178,95	150	0,0045	2.212,2	211,89
8	60	150	0,0122	2.212,2	178,72	150	0,0110	2.212,2	184,46
9	60	150	0,0088	2.212,2	178,68	150	0,0100	2.212,2	172,93
10	60	150	0,0100	2.212,2	172,94	150	0,0100	2.212,2	172,93
11	60	150	0,0045	2.212,2	178,95	150	0,0045	2.212,2	190,47

5 CONCLUSÕES

Diante da importância de uma rede de esgoto sanitário para a promoção da saúde pública e do elevado custo de execução, faz-se cada vez mais necessária a aplicação de métodos de otimização visando a diminuir os custos envolvidos, de forma a buscar o máximo aproveitamento do capital investido por órgãos governamentais.

O resultado obtido com o modelo em questão foi satisfatório. Além disso, vale destacar a utilização do sentido do escoamento como variável de decisão, pois a topografia tem impacto direto e bastante expressivo no valor do custo final de uma rede de esgoto.

A técnica dos algoritmos genéticos permitiu obter, após um número fixo de gerações, além da solução de mínimo custo, um conjunto final de soluções que torna possível ao tomador de decisões escolher entre alternativas com similaridade de preço, considerando na análise outros critérios de avaliação.

Enfim, espera-se que este estudo seja apenas um primeiro passo e que haja um aprimoramento do modelo proposto, de modo que possamos replicá-lo em redes reais, visando à minimização de custo e, conseqüentemente, ao incentivo à ampliação da cobertura de redes coletoras de esgoto em locais que estejam desprovidos deste recurso.

6 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Todos os autores contribuíram de forma igualitária.

7 REFERÊNCIAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR-9649 – **Projeto de redes coletoras de esgoto sanitário** – Procedimento. Rio de Janeiro: ABNT, 1986.

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR-12266 – **Projeto e execução de valas para assentamento de tubulação de água, esgoto ou drenagem urbana**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992.

ALEMSOBRINHO, P. TSUTIYA, M. T. **Coleta e transporte de esgoto sanitário**. 2^a. ed. São Paulo: Departamento de engenharia hidráulica e sanitária, Universidade de São Paulo, 2000.

BRASIL. **Lei nº. 11.445** - 05 jan (2007). Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico; altera as Leis nos 6.766, de 19 de dezembro de 1979, 8.036, de 11 de maio de 1990, 8.666, de 21 de junho de 1993, 8.987, de 13 de fevereiro de 1995; revoga a Lei no 6.528, de 11 de maio de 1978; e dá outras providências. <Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Ato2007-2010/2007/Lei/_leis2007.htm>. Acesso em 15 de dezembro de 2017.

COSTA, L.H.M. **Utilização de um algoritmo genético híbrido na operação de sistemas de abastecimento de água com ênfase na eficiência energética**. Fortaleza, 2010. 146 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2010.

EMBASA – Empresa baiana de águas e Saneamento S/A. **Sistemas urbanos de esgoto**. Salvador (BA), 2008.

GALVÃO, C. O.; VALENÇA, M. J. S. **Sistemas inteligentes: Aplicações a recursos hídricos e ciências ambientais**. Porto Alegre (RS): UFRGS/ABRH, 1999.

GAMEIRO, L. F. S. **Dimensionamento otimizado de redes de esgotos sanitários com a utilização de algoritmos genéticos**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Mato Grosso do Sul, 2003.

MOEINI, R. AFSHAR, M. H. Layout and size optimization of sanitary sewer network using intelligent ants. In: **Advances in Engineering Software**, Volume 51, 2012, 49-62p.

RODRIGUES, G. P. W. **Modelo computacional de redução de custos em redes coletoras de esgoto sanitário com a utilização de um algoritmo híbrido de busca**. 2011. 165 f. : Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza-CE, 2011.

SEINFRA. Secretaria da Infraestrutura. **Tabela de Custos Unificada SEINFRA - Tabela de Insumos - Versão 023**. Disponível em: <<http://www.seinfra.ce.gov.br/index.php/downloads/category/22-tabela-de-custos-verso-023?download=181%3Atabela-de-insumos>>. Acesso em: 26 out. 2017.

VELASCO, C. Saneamento melhora, mas metade dos brasileiros segue sem esgoto no país. Em: **G1** <<http://g1.globo.com/economia/noticia/saneamento-melhora-mas-metade-dos-brasileiros-segue-sem-esgoto-no-pais.ghtml>>. Acesso em: 22 junho 2017.)