

## Estudo de aplicação de uma micro central hidrelétrica para reaproveitamento de energia em estação de tratamento de esgoto

### *Study of application of a micro hydroelectric central for energy reaproveitment in a waste water treatment station*

Vinícius Oliveira Fávero<sup>1</sup>; José Gustavo Coelho<sup>2</sup>; Guilherme Azevedo Oliveira<sup>2</sup>; Francisco Aurilo Azevedo Pinho<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Engenheiro Mecânico. Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais Brasil.  
E-mail: vofavero@gmail.com.

<sup>2</sup> Professor de Engenharia Mecânica Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Uberaba, Minas Gerais Brasil. E-mail: jose.gustavo@uftm.edu.br; guilherme.oliveira@uftm.edu.br francisco.pinho@uftm.edu.br

**RESUMO:** As Estações de Tratamento de Esgoto, conhecidas como ETEs, tem a função de tratar a água presente nos esgotos das cidades devolvendo água límpida para o rio. O local de desague da água tratada geralmente apresenta características de queda d'água e vazão suficientes para gerar energia elétrica através da instalação de uma Micro Central Hidrelétrica (MCH). Foi analisada a ETE situada na cidade de Uberaba – MG e percebe-se que ela possui uma queda d'água de 6 metros com vazão média de 465 litros por segundo, podendo gerar cerca de 22,51 kW com a utilização de uma turbina Kaplan do tipo Bulbo. Essa potência tem um custo inicial de instalação com todos os componentes necessário da MCH de R\$ 136.217,89. Após isso, o presente estudo foi expandido de forma hipotética para outras Estações de Tratamento de Esgoto, mostrando a potência encontrada e o custo de instalação, variando as alturas de 1 a 11 m e a vazão de 200 a 1100 L/s.

**Palavras-chave:** Estações de Tratamento de Esgoto; Energia Alternativa; Micro Centrais Hidrelétricas; Pequenas Centrais Hidrelétricas; Redução de Custo.

**ABSTRACT:** *Sewage Treatment Plants, known as ETEs, have the function of treating the water present in the sewers of the cities by returning clear water to the river. The treated water drainage site generally has sufficient waterfall and flow characteristics to generate electricity through the installation of a Micro Hydropower Plant (MHP). The ETE located in the Uberaba city, (Brazil) was analyzed and it has been observed that it has a waterfall of 6 meters with an average flow of 465 liters per second, which can generate about 22.51 kW with the use of a Kaplan Bulb turbine. This power represents a cost with all the necessary components of the MHP of R \$ 136 217.89. After that, the present study was hypothetically expanded to other Sewage Treatment Stations, showing the power found and the cost of installation, varying from heights of 1 to 11 m and flow rate from 200 to 1100 L / s.*

**Keywords:** *Sewer treatment plants; Alternative energy; Micro hydroelectric plants; Hydroelectric plants; Cost reduction.*

## INTRODUÇÃO

A geração de energia elétrica no Brasil atingiu 581,5 TWh no ano de 2015, na qual a principal fonte de produção são as usinas hidrelétricas com uma participação de 64% na composição da matriz energética nacional (EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2016). A geração de energia em hidrelétricas não depende da queima de combustíveis que originam a poluição atmosférica, porém para construir grandes barragens como, por exemplo, a usina de Belo Monte se faz necessário inundar grandes áreas que levam a elevados impactos sociais. Além disso, as áreas inundadas sobre as florestas, levam a decomposição das plantas e a geração de gás metano que é altamente poluente e gerador do efeito estufa (PERIUS; CARREGARO, 2012).

Esses fatores são limitadores para o desenvolvimento de grandes projetos de usinas hidrelétricas na qual as licenças ambientais e a construção do empreendimento demoram anos para serem liberados e realizados. A alta dependência do sistema hidrelétrico brasileiro pode ser fator limitador para o desenvolvimento econômico do país, onde entre 1990 e 2000, o consumo energético cresceu 49% enquanto a capacidade instalada foi de 35% (TOMALSQUIM, 2000). Segundo Tolmasquim, Guerreiro e Gorini (2007) o Brasil terá um crescimento na demanda energética de 3,3% ao ano e exigindo um investimento de US\$ 750 bilhões até o ano de 2030 e será o sétimo maior consumidor de energia do mundo com 3,8% do investimento mundial energético. Percebe-se que o prognóstico é válido, uma vez que em 2008 a oferta interna de energia foi de 251860 mil tep (milhões de toneladas equivalente de petróleo), passando para 292099 mil tep em 2017 (SANTOS, 2008; BRASIL, 2017).

Nessa perspectiva, a utilização de energias alternativas com menores impactos ambientais e sociais possui grande influência na redução da sobrecarga energética brasileira, além de diminuir as disparidades da distribuição de energia entre as regiões do país. Algumas alternativas começaram a ser desenvolvidas para suprir as necessidades de energia como as usinas eólicas e solares, e nos últimos anos essas diminuíram de preço de forma considerável.

Diferente das grandes usinas, a implementação de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs) em cursos d'água de pequeno e médio porte demonstram uma alternativa de baixo custo e impacto ecológico (PERIUS; CARREGARO, 2012). As PCHs segundo a resolução nº 394-04-12-1998 de 1998 da Agência Nacional Energia Elétrica - ANEEL: Pequena Central Hidrelétrica – PCH: “são empreendimentos hidrelétricos com potencial de geração de 1.000 kW e igual ou inferior a 30.000 kW, com área total de reservatório igual ou inferior a 3,0 km<sup>2</sup>”.

Percebe-se que existe um potencial hidráulico ainda não explorado nas Estações de Tratamento de Esgoto (ETEs). O Brasil possui cerca de 702 plantas de tratamento de esgoto somando um volume tratado de 3.805.021,69 (1.000 m<sup>3</sup>/mês) com um gasto de energia de 1.179.543,93 (1000 kW/mês) (MCCARTY; BAE, 2012; FANG, 2015). No caso da cidade de Uberaba-MG a ETE Francisco Veludo foi projetada para atender uma população de 254.665 habitantes, correspondendo a 75% da população urbana da cidade. Para esta população a vazão média é de 465 L/s e máxima de 745 L/s, implicando em uma remoção de 90% de DBO<sub>5</sub>, quantidade necessária de oxigênio para estabilizar a matéria orgânica, resultado em uma carga diária de 12.224 kg/DBO<sub>5</sub> (EMPRESA DE TRATAMENTO DE ESGOTO DA CIDADE DE UBERABA, 2006).

O objetivo do projeto foi avaliar a viabilidade de instalação de uma Micro Central Hidrelétrica na ETE – Rio Uberaba, incluindo o cálculo de geração de energia elétrica,

seleção do tipo de turbina e análise do tempo de retorno do investimento inicial. O estudo foi expandido de forma a contemplar casos hipotéticos de queda d'água e vazão para auxiliar projetos futuros de implantação de MCHs em outras Estação de Tratamento de Esgoto. Segundo Harris, Dzwonkoski e Capua (2014) o estudo sobre o reaproveitamento de energia em ETEs ganhou grande relevância no contexto mundial em que somente na estação de Deer Island é gerado anualmente cerca de 6 milhões de kWh. Outro fator relevante, segundo Nyserda et al. (2012), consiste em que as ETEs são grandes consumidoras de energia representando cerca de 25 a 40% das despesas de operação. Nessas condições, as estratégias de expansão energética devem contemplar projetos em lagoas de tratamento focando em suas potencialidades, fatores ambientais e viabilidade econômica, auxiliando na demanda energética brasileira.

## REVISÃO DE LITERATURA

Desenvolvido no ano de 1982 pela ELETROBRAS, Centrais Hidrelétricas S.A em convênio com o DNAEE (Departamento Nacional de Águas e Energia Elétrica), hoje ANEEL (Agência Nacional de Energia Elétrica), o primeiro manual de pequenas centrais hidrelétricas foi criado por ocasião do Programa Nacional de Pequenas Centrais Hidrelétricas (PNPCHS). Este manual foi desenvolvido para regulamentar e auxiliar os empreendedores a desenvolver projetos de centrais geradoras de energia elétrica, devido ao fato de no ano de 1941 já existir 888 PCHs e 1 unidade geradora de energia elétrica (ELETROBRAS, 1999).

Segundo a Eletrobras (1999) as Pequenas Centrais Hidrelétricas podem ser classificadas quanto a sua capacidade de regularização do reservatório, sistema de adução e potência gerada. As PCHs podem ser ainda classificadas quanto à potência instalada e à queda de projeto, **Tabela 1**, esses dois valores foram definidos porque somente uma variável não permite uma classificação adequada.

**Tabela 1:** Classificação das PCHs quanto a potência e queda de projeto.

Classificação das Centrais	Potência – P [KW]	Queda de projeto – H [m]		
		Baixa	Média	Alta
Micro	$P < 100$	$H < 15$	$15 < H < 50$	$H > 50$
Mini	$100 < P < 1000$	$H < 20$	$20 < H < 100$	$H > 100$
Pequenas	$1000 < P < 30000$	$H < 25$	$25 < H < 130$	$H > 130$

Fonte: Eletrobras, 1999.

Segundo Guitarrara (2012), os componentes básicos de Centrais Hidrelétricas são: Barragem, tomada d'água, sistema de adução, câmara de carga, chaminé de equilíbrio, casa de máquinas, turbinas, gerador, grade, tomada d'água, entre outros. Na **Figura 1** são ilustrados esses componentes.

A implantação da Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) do Rio Uberaba se mostrou atraente para o município de Uberaba-MG, pois no ano de 2006 a coleta de esgoto atingia cerca de 98% dos habitantes da cidade (CENTRO OPERACIONAL DE DESENVOLVIMENTO E SANEAMENTO DE UBERABA, 2006). Porém, todo o esgoto coletado era lançado "in natura" nos diversos córregos e canais que cruzam a cidade gerando a poluição do Rio Uberaba. O projeto "Água Viva" previu a implantação de dois

sistemas de esgoto independentes, o sistema Uberaba e o sistema Conquistinha, onde são responsáveis, respectivamente, por atender o tratamento de 75% e 25% da população urbana de Uberaba-MG (VIVA, 2007).

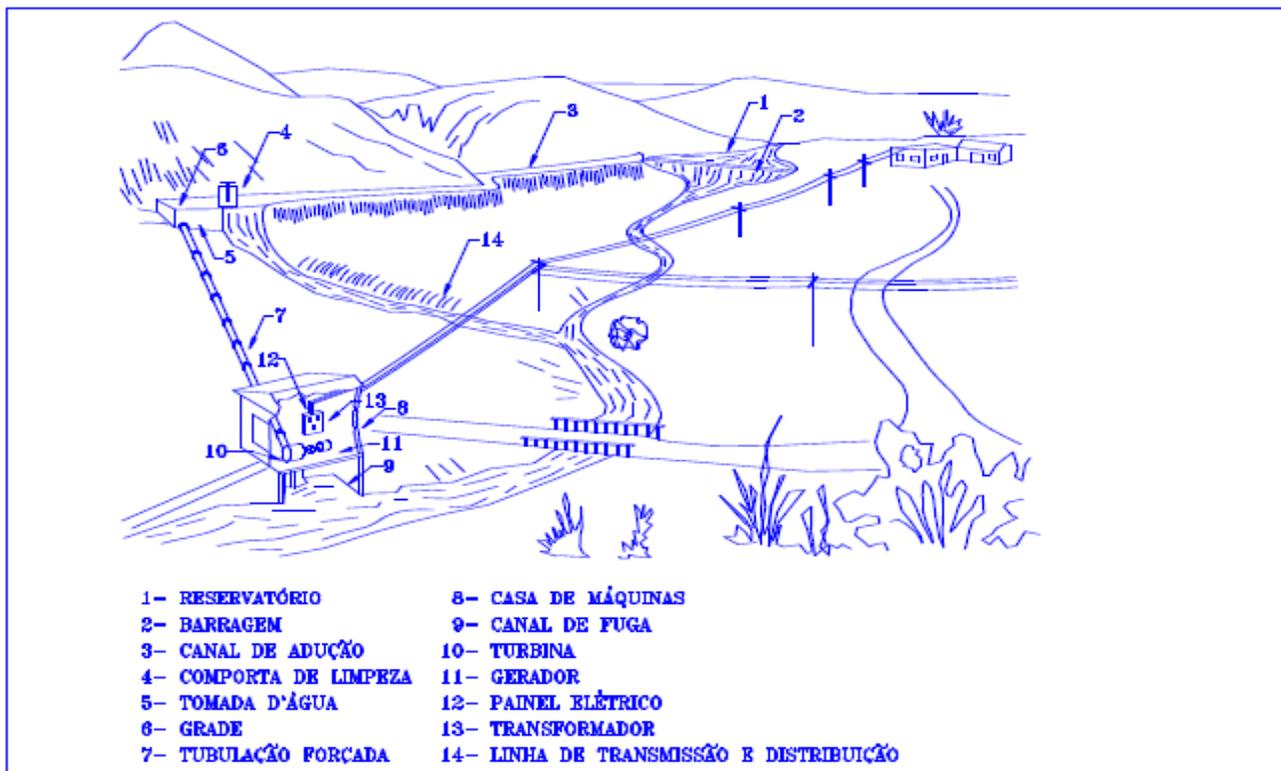
Segundo o Centro Operacional de Desenvolvimento e Saneamento de Uberaba (2006) a estação de ETE-Rio Uberaba utiliza o reator UASB – *Upflow Anaerobic Sludge Blanket* –, que consiste em uma tecnologia baseada na decomposição anaeróbica, seguida por uma Lagoa Aerada.

A Estação de Tratamento de Esgoto de Uberaba-MG foi projetada para uma vazão prevista de esgoto de 465 litros por segundo (L/s) com vazão máxima de 745 L/s e uma redução de carga orgânica de 12.224 kg/DBO5 por dia (CENTRO OPERACIONAL DE DESENVOLVIMENTO E SANEAMENTO DE UBERABA, 2006).

Até o ano de 2018 a ETE ainda não atingiu o seu limite de tratamento de esgoto, pois nem todas as ligações de esgoto da cidade estão prontas, tratando cerca de 400 L/s, porém para o dimensionamento foi utilizada a vazão de projeto devido ao fato de um sistema de geração de energia durar em média 25 anos e nesse tempo a ETE atingirá o seu limite de operação.

A **Figura 2** apresenta uma foto panorâmica da ETE Rio Uberaba com todos os componentes explicados anteriormente.

**Figura 1:** Principais componentes de uma micro usina hidrelétrica



Fonte: Mauad (2002) apud Guitarrara (2012).

De acordo com as condições de queda de coluna d'água e vazão disponíveis, pode-se instalar turbina hidráulica para aproveitar essa condição já existente nos projetos de tratamento de esgoto. Os custos de implantação de uma pequena central hidrelétrica foram parametrizados por Duarte (2009) através de estudos comparativos com cerca de 17 empreendimentos. Estimação de custos através da parametrização são obtidos

usando relações estatísticas entre dados históricos e variáveis físicas ou características de performance (NASA, 2015).

**Figura 2** - Panorama geral da Estação de Tratamento de Esgoto Francisco Veludo



Fonte: COMENG, 2017.

Para utilizar de dados parametrizados é necessário realizar a correção do valor de construção civil através do Índice Nacional de Custos da Construção – INCC. Este índice foi desenvolvido para apurar a evolução dos custos na construção civil coletando os custos em 7 capitais brasileira - São Paulo, Rio de Janeiro, Belo Horizonte, Salvador, Recife, Porto Alegre e Brasília (FUNDAÇÃO GETULHO VARGAS, 2017).

## PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os estudos de implantação de micro centrais hidrelétricas devem seguir algumas premissas básicas como: estudos gerais, projeto, especificações e análise econômica (SOUZA et al., 2009).

O trabalho utilizará a metodologia de implantação do Manual de Micro Centrais Hidrelétricas da Eletrobras (1985) juntamente com artigos de revisão bibliográfica de implantação de micro centrais geradoras de energia em estações de tratamento de esgoto.

Os dados utilizados no projeto serão coletados segundo o Relatório de Impactos Ambientais – RIMA (EMPRESA DE TRATAMENTO DE ESGOTO DA CIDADE DE UBERABA, 2006)

A determinação da potência é essencial para o dimensionamento da turbina e do gerador de energia, o seu cálculo leva em consideração variáveis como a massa específica da água, aceleração da gravidade, eficiência da turbina e vazão volumétrica. A Eq. 1 demonstra matematicamente como é calculado o valor para a potência (HARRIS; DZWONKOSKI; CAPUA, 2014).

$$P = \eta \rho_w g Q H \quad (1)$$

Em que,  $P$  é a potência da turbina [kW],  $\eta$  a eficiência da turbina (unidades),  $\rho_w$  a massa específica da água [kg/m<sup>3</sup>],  $g$  a aceleração da gravidade [m/s<sup>2</sup>],  $Q$  a descarga de projeto [m<sup>3</sup>/s] e  $H$  a queda bruta [m].

A eficiência média de uma turbina hidráulica está normalmente entre 85 e 95%, sendo as perdas hidráulicas e mecânica as principais responsáveis na diminuição da eficiência (SOARES, 2013). Para este estudo será utilizado a eficiência de 85%

Segundo o Manual de PCHS da Eletrobras (1999) A perda de carga na entrada da tubulação é estimada da seguinte forma:

$$h_e = k_e \frac{V^2}{2g} \quad (2)$$

Onde o coeficiente  $k_e$  pode ser obtido através do tipo de entrada escolhida para o projeto e  $V$  a Velocidade média (m/s).

A equação de Darcy-Weisbach, representada na Eq. 3, é utilizada para determinar a perda por atrito através da tubulação (HARRIS; DZWONKOSKI; CAPUA, 2014).

$$h_f = f_D \frac{LV^2}{2Dg} \quad (3)$$

sendo  $h_f$  é Perda de carga por atrito [m],  $f_D$  o Fator de atrito de Darcy [adimensional],  $D$  o Diâmetro Interno da tubulação (m), e  $L$  o comprimento da tubulação (m).

Os custos para a instalação do sistema na estação de tratamento de esgoto são relacionados à tubulação de alta pressão, turbina e gerador, construção da casa de força e outros custos relacionados a instalação. Duarte (2009) parametrizou os custos de instalação desses sistemas, sendo eles o da tubulação, casa de máquinas, turbina e gerador. Esses custos são dimensionados de acordo com as Eq. 4, 5 e 6, respectivamente.

$$Cca = 0,23L^{1,16} Q^{1,03} \quad (4)$$

$$Ccf = 437n^{1,64} H^{-0,388} P^{0,635} \quad (5)$$

$$Ctg = 17,12n^{-1,07} H^{0,908} Q^{1,2} \quad (6)$$

Onde  $Cca$  = custo do conduto de alta pressão (x 10<sup>3</sup> R\$),  $Ccf$  = custo da casa de força (x 10<sup>3</sup> R\$),  $n$  = número de máquinas,  $P$  = potência [MegaWatt],  $H$  a queda d'água [m] e  $Ctg$  = custo da turbina e do gerador (x 10<sup>3</sup> R\$).

O custo do sistema técnico pode ser obtido através do somatório dos valores custos obtidos através das Eq. 4 a 6 . O valor final deve ser corrigido de acordo com a Eq. (7)

$$Custo_{ST} = Custo \left( 1 + \frac{ld}{100} \right) \quad (7)$$

Em que,  $Custo_{ST}$  é custo dos sistemas técnicos (x 10<sup>3</sup> R\$) e  $ld$  = índice INCC acumulado de novembro de 2008 até a data que se deseja o valor.

Por fim, o custo total do sistema corresponde à Eq. 8,

$$C_{tot} = C_{ST} + outros\ custos \quad (8)$$

De forma que  $C_{tot}$  = Custo Total (x 10<sup>3</sup> R\$) e  $C_{ST}$  = Custo dos Sistemas Técnicos (x 10<sup>3</sup> R\$) Necessita-se determinar o tempo de retorno do investimento inicial no projeto, para isso é necessário calcular o valor economizado com a geração de energia elétrica através da Eq. (9).

$$Geração = P * 24 * 365 * Tarifa \quad (9)$$

Onde  $Geração$  é valor total da energia gerada (R\$),  $P$  a potência [kW] e  $Tarifa$  é a tarifa média de energia elétrica (R\$).

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para realizar o projeto da Micro Central Hidrelétrica foi necessário analisar os fatores que podem ser adequados aos projetos de micro centrais e os fatores que devem ser adaptados ao sistema para serem implantados em uma Lagoa de tratamento.

As dimensões das lagoas e os dados de tratamento foram obtidos com a visita na ETE, e através do Relatório de Impacto Ambiental – RIMA, 2006 da ETE Rio Uberaba, onde consta os dados sobre a estação.

Para determinar a vazão média de saída foi necessário avaliar a redução de sólidos ao longo do tratamento de esgoto, com uma redução de 90% de DBO5, vazão de 465 L/s e diminuição de 304,42 mg/L de DBO5 e 507,34 mg/L de DQO, Demanda Química de Oxigênio, é possível calcular a vazão de saída da última lagoa de tratamento.

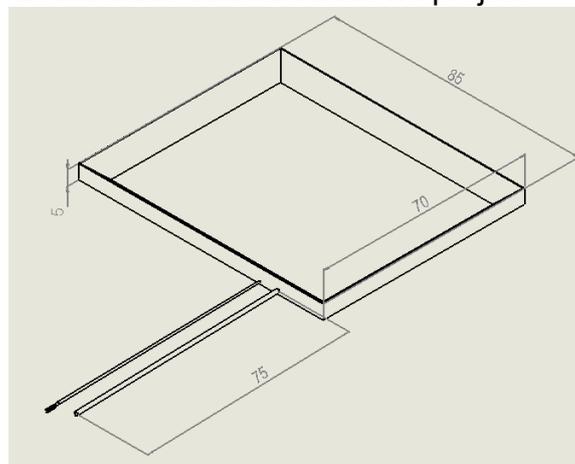
A altura de queda foi determinada por medições no local e por meio do projeto da última Lagoa Aerada Facultativa que libera esgoto tratado para no Rio Uberaba. A altura encontrada foi de 6 metros, sendo 5 de coluna d'água e 1 metro entre a lagoa e o local de descarga, com uma distância de 75 metros até o local onde a turbina deve ser instalada. Por meio dos valores de queda de 6 metros e vazão de 465 L/s é possível encontrar a potência de 23,2 kW para o local de descarga de água da ETE – Rio Uberaba. A **Figura 3** representa esquematicamente a última lagoa de aeração, todos os valores presentes na figura estão com unidades em metros.

A **Tabela 2** mostra a variação de potência produzida conforme a variação da vazão do tratamento de esgoto comparando a geração de energia mecânica atual, com a de projeto e o máximo que pode ser gerado pela micro central hidrelétrica, levando em consideração somente a estimativa da potência de geração de energia mecânica no local de deságua de água.

Contudo, para encontrar o valor real de produção de energia é necessário encontrar a potência líquida, onde as perdas hidrodinâmicas são levadas em consideração. Para isso é necessário dimensionar a tubulação e encontrar a perda de carga total. Neste projeto, foram analisados dois tipos comuns de materiais para tubulação de água que são utilizados tanto nas ETEs quanto em pequenas centrais hidrelétricas, que são o concreto e o aço. Para determinar qual o diâmetro e velocidade média do escoamento utiliza-se os dados encontrados em Eletrobras (1985). O custo médio dos dois tipos de tubulação com assentamento e instalação segundo Bevilacqua (2006) é de R\$ 400,00 por metro para o aço e R\$ 150,00 para o concreto. A **Tabela 3** contém os dados encontrados para ambos os tipos de materiais.

A tubulação de aço apresenta menores diâmetros, porém, tem maior custo de compra e instalação e tem maiores velocidade de escoamento do que os tubos de cimento.

**Figura 3** - Medidas esquemáticas com as medidas consideradas no projeto



**Tabela 2** - Variação do Potencial em relação a vazão

Condição	Queda [m]	Vazão [L / s]	Potencial [kW]
Vazão atual	6	400	20
Vazão de projeto	6	465	23,3
Vazão máxima	6	745	37,31

**Tabela 3** - Comparação entre os valores das tubulações de aço e concreto

Material da tubulação	Diâmetro interno [Polegadas]	Diâmetro externo [Polegadas]	Velocidade dentro da tubulação [m]	Preço material e assentamento [R\$ / m]
Aço	26	3 / 16	1,383	400
Cimento	27	3 / 16	1,291	150

O próximo passo para decidir qual material a ser utilizado é calcular as perdas de carga e o seu impacto na potência líquida. Utilizando os dados de Diâmetro Interno da **Tabela 4** foi possível calcular a perda de carga para os dois tipos de tubos. Os resultados estão dispostos na **Tabela 5**. Na entrada da tubulação foi considerado o tipo de boca com

aresta viva obtendo o valor de Coeficiente de Perda de Carga ( $k_e$ ) que é igual a 0,5 (ELETROBRAS, 1999).

Para determinar a perda de carga distribuída foi utilizado o diagrama de Moody, encontrando um fator de atrito de Darcy igual a 0,011 (escoamento turbulento). Percebe-se que a tubulação de aço apresenta uma perda de carga menor que a de cimento. Obtidas as perdas de carga, a potência líquida instalada foi encontrada utilizando a Eq. 1, com massa específica igual a  $1000 \text{ kg/m}^3$  e aceleração da gravidade de  $9,82 \text{ m/s}^2$ . Para o aço encontra-se 22,6 kW e para o cimento 22,51 kW. Logo, a tubulação de cimento apresenta o menor custo de instalação e as potências são muito similares, a **Tabela 5** apresenta um resumo dos valores encontrados.

No local de instalação da turbina já existe uma tubulação que é utilizada para devolver o esgoto já tratado para o Rio Uberaba. Neste local a tubulação possui diâmetro de 100 centímetros. Não é adequado utilizar esta tubulação, pois o mesmo é muito maior que o necessário para o projeto, com isso o ar atmosférico entra na tubulação e produz uma redução de potência hidráulica que reflete na produção de energia elétrica. A **Figura 4** mostra esquematicamente a disposição das tubulações em relação à lagoa de tratamento; deve-se construir um sistema de fechamento para a tubulação existente de forma que ela só possa ser utilizada quando tiver excesso de água no sistema.

O tipo de turbina hidráulica escolhido para o projeto é a Kaplan. Faz-se essa escolha se baseando na literatura, no trabalho de Henn (2012), onde essa apresenta a melhor relação de vazão por altura disponível. Além disso, as turbinas Kaplan do tipo Bulbo são as indicadas quando se tem uma pequena altura de elevação. Por ela ficar na horizontal, não exige um grande gasto com escavação (COELHO, 2006).

Para estimar os custos de projeto foi utilizada a parametrização vista anteriormente. O valor do INCC de Novembro de 2008, quando a parametrização foi realizada, até Abril de 2017, data de realização do presente projeto, variou de 1.415,0368 pontos para 2.415,7596, aumentando o custo do projeto em 70% (FUNDAÇÃO GETULIO VARGAS, 2017).

As relações de custos de instalação da Mico Central Hidrelétrica na ETE Uberaba estão dispostas na **Tabela 6**, incluindo a aquisição e instalação de todos os componentes.

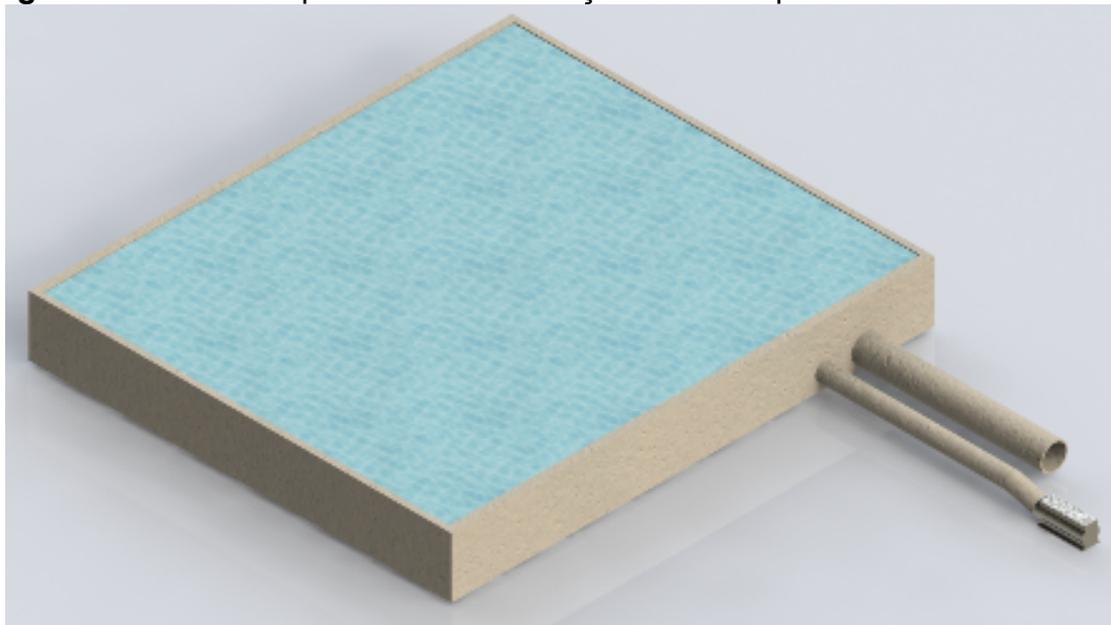
**Tabela 4** - Perda de Carga para os dois tipos de tubulação

Material da tubulação	Rugosidade relativa	Reynolds	Perda de carga distribuída [m]	Perda de carga localizada [m]	Perda de carga total [m]
Aço	$4,50 \times 10^{-5}$	$9 \times 10^5$	0,123	0,0487	0,172
Cimento	$3,04 \times 10^{-4}$	$8,4 \times 10^5$	0,156	0,0424	0,198

**Tabela 5** - Comparativo entre os materiais de tubulação

Material da tubulação	Potência líquida [kW]	Diâmetro Interno [Polegadas]	Queda líquida [m]	Perda de carga [m]	Custo [R\$ / m]
Aço	22,60	26	5,82	0,172	400
Cimento	22,51	27	5,80	0,198	150

**Figura 4** - Modelo esquemático da tubulação e turbina para a central hidrelétrica



**Tabela 6** - Relação de custos para a instalação da Central Hidrelétrica da ETE Uberaba-MG

Sistema	Custo corrigido INCC (R\$)	Porcentagem do valor final (%)
Tubulação	26590,37	19,52
Casa de força	32777,64	24,06
Turbina e gerador	59082,32	43,37
Outros custos	17767,55	13,04
Custo final	136217,89	100,0

O projeto da micro central hidrelétrica da ETE-Uberaba foi estendido para outras estações de tratamento de esgoto de forma a proporcionar material necessário para facilitar possíveis empreendimentos hidrelétricos. A análise foi realizada utilizando comprimento de tubulação de 75 metros, variação de vazão de 200 L/s à 1100 L/s e queda de 1 a 11 metros. Não foi efetuado o cálculo dos diâmetros mínimos das tubulações, somente os valores de potência e custo para analisar a viabilidade de investimentos nos casos propostos.

Primeiramente, foi necessário calcular a potência para todos os casos hipotéticos e analisar a geração de energia mecânica, a **Tabela 7** resume os valores encontrados para a potência em quilowatt.

**Tabela 7 - valores de potência para os casos hipotéticos**

		Altura [m]										
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	200	1,38	3,1	4,7	6,4	8,1	9,7	11,4	13,1	14,7	16,4	18,1
	300	2,07	4,6	7,1	9,6	12,1	14,6	17,1	19,6	22,1	24,6	27,1
	350	2,42	5,3	8,3	11,2	14,1	17,0	19,9	22,9	25,8	28,7	31,6
	400	2,77	6,1	9,4	12,8	16,1	19,5	22,8	26,1	29,5	32,8	36,2
	450	3,11	6,9	10,6	14,4	18,1	21,9	25,6	29,4	33,2	36,9	40,7
	500	3,46	7,6	11,8	16,0	20,2	24,3	28,5	32,7	36,8	41,0	45,2
	550	3,80	8,4	13,0	17,6	22,2	26,8	31,3	35,9	40,5	45,1	49,7
	600	4,15	9,2	14,2	19,2	24,2	29,2	34,2	39,2	44,2	49,2	54,2
	650	4,49	9,9	15,3	20,8	26,2	31,6	37,0	42,5	47,9	53,3	58,7
	700	4,84	10,7	16,5	22,4	28,2	34,1	39,9	45,7	51,6	57,4	63,3
	750	5,19	11,4	17,7	24,0	30,2	36,5	42,7	49,0	55,3	61,5	67,8
	800	5,53	12,2	18,9	25,6	32,2	38,9	45,6	52,3	59,0	65,6	72,3
	850	5,88	13,0	20,1	27,2	34,3	41,4	48,4	55,5	62,6	69,7	76,8
	900	6,22	13,7	21,2	28,8	36,3	43,8	51,3	58,8	66,3	73,8	81,3
	950	6,57	14,5	22,4	30,4	38,3	46,2	54,1	62,1	70,0	77,9	85,9
1000	6,91	15,3	23,6	32,0	40,3	48,6	57,0	65,3	73,7	82,0	90,4	
1050	7,26	16,0	24,8	33,6	42,3	51,1	59,8	68,6	77,4	86,1	94,9	
1100	7,61	16,8	26,0	35,2	44,3	53,5	62,7	71,9	81,1	90,2	99,4	
		KW										

É possível analisar que quanto maior a vazão e queda d'água, maior é a potência gerada pela turbina. Em seguida foram calculados os custos para cada condição de queda e vazão, os custos variam conforme a **Tabela 8**, sendo os valores listados, correspondentes ao custo total do projeto conforme a Eq. 8.

**Tabela 8 - Custo total conforme a variação de queda (m) e vazão (L/s)**

		Queda [m]							
		1	3	5	6	7	9	11	
(L/s) (L/s)(L/s)	200	31836,02	46113,29	56935,35	61976,54	66582,55	75580,92	84150,83	
	300	45689,67	66917,66	83503,43	91317,79	98473,17	112538,03	125999,11	
	350	52532,09	77295,07	96853,95	106105,62	114583,47	131282,92	147292,27	
	400	59339,86	87676,72	110262,57	120980,97	130808,96	150201,29	168817,64	
	450	66122,53	98070,89	123733,44	135945,54	147148,96	169287,28	190564,04	
	500	72886,84	108482,92	137268,44	150999,15	163601,35	188534,54	212520,78	
	550	79637,72	118916,34	150868,15	166140,65	180163,35	207936,77	234677,94	
	600	86378,89	129373,52	164532,34	181368,35	196831,87	227487,90	257026,40	
	650	93113,18	139856,02	178260,34	196680,30	213603,77	247182,21	279557,83	
	700	99842,82	150364,88	192051,22	212074,46	230475,93	267014,34	302264,57	
	750	106569,57	160900,75	205903,86	227548,71	247445,34	286979,31	325139,66	
	800	113294,86	171464,01	219817,06	243101,00	264509,10	307072,45	348176,65	
	850	120019,83	182054,85	233789,59	258729,30	281664,44	327289,46	371369,65	
	900	126745,44	192673,31	247820,20	274431,65	298908,74	347626,29	394713,21	
	950	133472,45	203319,33	261907,65	290206,18	316239,53	368079,19	418202,27	
1000	140201,53	213992,78	276050,74	306051,09	333654,44	388644,64	441832,15		
1050	146933,21	224693,46	290248,28	321964,64	351151,25	409319,35	465598,49		
1100	153667,95	235421,13	304499,12	337945,21	368727,85	430100,24	489497,23		

## CONCLUSÕES

O Brasil possui 702 plantas de tratamento de esgoto que tratam mais de 3,8 bilhões de metros cúbicos por mês, com isso demonstra um grande potencial hídrico que é devolvido aos rios e sem ter nenhum tipo de aproveitamento energético.

A água que flui através das lagoas de tratamento pode ser utilizada como fonte de energia hidráulica de forma a produzir energia elétrica reduzindo os custos do tratamento de água e auxiliando na redução da sobrecarga energética brasileira. Esse estudo teve como objetivo avaliar a instalação de uma micro central hidrelétrica na ETE Rio Uberaba e, além disso, traçar um panorama da implantação desses sistemas em outras unidades de tratamento de esgoto no Brasil.

A ETE Rio Uberaba é responsável por tratar 75% do esgoto da cidade e a água tratada tem uma vazão média de 465 litros por segundo, gerando cerca de 20,5 kW de potência hidráulica de 14756 kWh de energia elétrica por mês. O custo inicial da instalação de todos os componentes foi de cerca de R\$ 136217,89. O tipo de turbina indicado para o sistema é a Kaplan do tipo Bulbo, devido a maior facilidade de instalação na tubulação e de não necessitar da construção de grandes estruturas de concreto.

Também foram apresentados diferentes configurações de potências geradas e custos de construção, onde se variou a altura de 1 a 11 m e a vazão de 200 a 1100 L/s, mostrando qual seria a potência gerada e o custo de instalação para cada caso.

Dessa forma, as micro centrais demonstraram ser uma alternativa interessante para a geração de energia nas ETEs existentes e abrem caminho para o desenvolvimento de projetos no futuro que podem gerar mais energia elétrica.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo suporte a esta pesquisa por meio do projeto APQ-00620-14.

## REFERÊNCIAS

BEVILACQUA, N. **Materiais de tubulações utilizadas em sistemas de coleta e transporte de esgotos sanitários: estudo de caso da área norte de São Paulo**. 2006. Dissertação (Mestrado em Engenharia Hidráulica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006. DOI: 10.11606/D.3.2006.tde-08122006-153912. Acesso em: 16 abr. 2019.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2026** / Ministério de Minas e Energia. Empresa de Pesquisa Energética. Brasília: MME/EPE, 2017. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-40/PDE2026.pdf> Acesso em: 16 abr. 2019.

CENTRO OPERACIONAL DE DESENVOLVIMENTO E SANEAMENTO DE UBERABA (CODAU). **Relatório de Impactos Ambientais (RIMA): Relatório Técnico**. Uberaba, v. I, n. 34, 2006.

COELHO, J. G. **Estudo numérico de tubos de sucção de turbinas hidráulicas tipo bulbo, Dissertação de mestrado**. 2006. 110 f. Dissertação (Mestrado em Ciências

Mecânicas) - Universidade de Brasília, Brasília, 2006. Disponível em: <http://repositorio.unb.br/handle/10482/6258> Acesso em: 16 abr. 2019.

DUARTE, L. M. S. **Estimativa de Custos para Projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**, Itajuba, 2009.

ELETROBRAS CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Diretrizes para estudo e projetos de pequenas centrais hidrelétricas: manual técnico**, 1999. Rio de Janeiro (RJ), 199p. Disponível em: [www.eletronbras.com.br](http://www.eletronbras.com.br). Acesso em: 16 abr. 2019.

ELETROBRAS CENTRAIS ELÉTRICAS BRASILEIRAS. **Diretrizes para estudos e projetos de Pequenas Centrais Hidrelétricas**. Rio de Janeiro (RJ), 199p. v. 21, 2000. Disponível em: [www.eletronbras.com.br](http://www.eletronbras.com.br). Acesso em: 16 abr. 2019.

EMPRESA DE ENERGIA ELÉTRICA (EPE). **Brazilian Energy Balance 2016 Year 2015**. EPE. Rio de Janeiro, 2016, p. 296. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-en/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-126/topico-94/Relatório%20Final%202016.pdf> Acesso em: 16 abr. 2019.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balço Energético Nacional**. Relatório síntese, ano base 2017, Rio de Janeiro, 2018. Disponível em: <http://www.epe.gov.br/sites-en/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-180/Summary%20Report%202018.pdf> Acesso em: 16 abr. 2019.

FUNDAÇÃO GETÚLIO VARGAS. **Índice Nacional da Construção Civil**. Disponível em: <http://portalibre.fgv.br/main.jsp?lumChannelId=402880811D8E34B9011D92B7684C11DF>. Acesso em: 18 mar. 2017.

GUITARRARA, G. B. **Estimativa de vazão para a implantação de micro-centrais hidrelétricas com utilização do SIG**. São Carlos, 2012. 44 p. Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação em Engenharia Elétrica, Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Disponível em: [www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce.../Guitarra\\_Gabriel\\_Bozzola.pdf](http://www.tcc.sc.usp.br/tce/disponiveis/18/180500/tce.../Guitarra_Gabriel_Bozzola.pdf) Acesso em: 16 abr. 2019.

HARRIS, C. D.; DZWONKOSKI, J.; CAPUA, M. R. **Reclamation of Power in Wastewater Treatment Facilities**. 2014. Disponível em: <https://digitalcommons.wpi.edu/mqp-all/3445/> Acesso em: 16 abr. 2019.

HENN, E. A. L. **Máquina de Fluido**. 3. ed. Santa Maria: Editora UFSM, 2012.

MCCARTY, P. L.; BAE, J.; KIM J. Domestic Wastewater Treatment as a Net Energy Producer À Can This be Achieved ?. **California: Environmental Science & Technology**, 2011, p. 6. Disponível em: <https://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es2014264> Acesso em: 16 abr. 2019.

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA (Brasil). **Informativo Tarifário: Energia Elétrica**. 22a Edição. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3210408/Informativo+Tarifário+Energia+Elétrica>

a+-+20o+edição+-+Outubro+2016+(PDF+-+2o+Quadro+Texto).pdf/d9508f7c-6bf5-49ba-8089-371fc0af5ffe?version=1.0 Acesso em: 20 mai. 2017.

NASA - **Executive cost analysis steering group:NASA cost estimating handbook**. NASA. EUA. 4 Ed., 2015, p. 63.

NYSERDA. **Hydropower from Wastewater: final report 2011**. New York State n. 12, 2011.

PERIUS, M. R.; CARREGARO, J. B. Pequenas centrais hidrelétricas como forma de redução de impactos ambientais e crises energéticas: ensaios e ciência ciências biológicas. **Ensaio e Ciência: C. Biológicas, Agrárias e da Saúde**, v. 16, n. 2, 2015.

Disponível em:

<http://revista.pgsskroton.com.br/index.php/ensaioeciencia/article/view/2813>. Acesso em: 16 abr. 2019.

PROJETO AGUA VIVA. **Projeto de recuperação ambiental da bacia do rio Uberaba e revitalização do sistema de abastecimento de água – Projeto Água Viva**, 2007, 16 p.

Disponível em:

[http://www.uberaba.mg.gov.br/portal/acervo/agua\\_viva/arquivos/avaliacao\\_ambiental/Uberaba%20EA%20SumarioEX\\_R14\\_PORTU.pdf](http://www.uberaba.mg.gov.br/portal/acervo/agua_viva/arquivos/avaliacao_ambiental/Uberaba%20EA%20SumarioEX_R14_PORTU.pdf) Acesso em: 16 abr. 2019.

SANTOS, T. B. **Decisão de investimento: estudo de viabilidade de uma pequena central hidrelétrica**. 2008. p. 61. Disponível em:

<https://www.lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/18125/000686733.pdf?sequence=1>

Acesso em: 16 abr. 2019.

SOARES, J., R. L. **Projeto conceitual de uma turbina hidráulica a ser utilizada na usina hidrelétrica externa de Henry Borden**, 2013, p. 73. Disponível em:

<http://monografias.poli.ufrj.br/monografias/monopoli10005429.pdf>. Acesso em: 16 abr. 2019.

SOUZA, Z.; SANTOS, A. H. M.; BORTONI, E. C. **Centrais Hidrelétricas - Implantação e Comissionamento**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência Ltda, 2009.

TOLMASQUIM, M. T. As origens da crise energética brasileira. **Ambient.**

**Soc.**, Campinas, n. 6-7, p. 179-183, June 2000. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S1414-753X2000000100012>. Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1414-](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2000000100012&lng=en&nrm=iso)

[753X2000000100012&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1414-753X2000000100012&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 16 abr. 2019.

TOLMASQUIM, M. T.; GUERREIRO, A.; GORINI, R. Matriz energética brasileira: uma perspectiva. **Novos estud. - CEBRAP**, São Paulo, n. 79, p. 47-69, Nov. 2007.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/S0101-33002007000300003>. Disponível em:

<[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0101-](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-33002007000300003&lng=en&nrm=iso)

[33002007000300003&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0101-33002007000300003&lng=en&nrm=iso)>. Acesso em: 16 abr. 2019.

Recebido em: 10/10/2018.

Aprovado em: 16/04/2019.